précipitations acides

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PHYSICO-CHIMIE DES LACS DE LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS, EN RELATION AVEC LES PROCESSUS D'ACIDIFICATION

PA-17

Québec

87-00653/

DIRECTION DES RELEVÉS AQUATIQUES

ÉTUDE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PHYSICO-CHIMIE DES LACS DE LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS, EN RELATION AVEC LES PROCESSUS D'ACIDIFICATION

PA-17

Jacques Dupont M.Sc.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC
QUÉBEC, DÉCEMBRE 1985

Dépôt légal - 4e trimestre 1985
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada
ISBN 2-550-12610-6

Envirodoq 850744

RÉDACTION

Jacques Dupont, M.Sc.

RÉVISION SCIENTIFIQUE

Lévis Talbot, M.Sc. (Direction des relevés aquatiques)
Yves Grimard, M.Sc. (Direction des relevés aquatiques)

RÉVISION LINGUISTIQUE

Martine P. Gagné (Direction des communications et de l'éducation)

GRAPHISME

Rémi Lessard
André Dion
Jacques Dupont

RÉSUMÉ

En mars 1983, le Service de la qualité des eaux du ministère de l'Environnement du Québec a entrepris un échantillonnage physico-chimique de 36 lacs du secteur de Pontiac-Témiscamingue Sud, de 17 lacs du secteur de Papineau-Labelle et de 29 lacs du secteur du parc du Mont-Tremblant. Les principaux objectifs de l'étude étaient de déterminer l'influence des précipitations acides dans une des régions les plus exposées au Québec et d'obtenir des données physico-chimiques de base pour d'éventuelles études portant sur l'impact de l'acidification sur la faune aquatique.

L'examen de la variabilité spatiale de la physico-chimie des lacs, l'utilisation de méthodes statistiques et l'application de modèles empiriques ont révélé, que parmi les secteurs étudiés, les lacs du Pontiac-Témiscamingue Sud étaient les plus affectés par l'action des acides forts. De plus, la totalité des lacs des trois secteurs étudiés auraient été acidifiés à divers degrés par les acides forts (baisse de 0,2 à 1,3 unité de pH). Par ailleurs, les acides organiques faibles ne joueraient qu'un rôle mineur sur l'acidité des lacs de l'Outaouais, laquelle serait surtout due à l'acide sulfurique provenant des dépôts atmosphériques, mais les acides organiques contribueraient à accentuer l'acidification des eaux lacustres causée par les acides forts.

MOTS CLÉS: acidification, acidité, vulnérabilité, physico-chimie, sulfate, minéralisation, modèle, analyse multivariée, analyse discriminante, analyses statistiques, lacs, précipitations acides, Outaouais, géologie, acides organiques, substances humiques.

DUPONT, J. 1985. Étude de la variabilité spatiale de la physico-chimie des lacs de la région de l'Outaouais, en relation avec les processus d'acidification. Direction des relevés aquatiques, ministère de l'Environnement du Québec, publication nº PA-17, Envirodoq No 850744, 110 pages, 4 annexes.

TABLE DES MATIÈRES

- RÉSUMÉ V

- TABLE DES MATIÈRES VII

- LISTE DES TABLEAUX IX

- LISTE DES FIGURES XI

- LISTE DES ANNEXES XIV

- REMERCIEMENTS XV

I. INTRODUCTION 1

II. DESCRIPTION DU MILIEU PHYSIQUE 5

III. MÉTHODOLOGIE 9
- 3.1 Sélection des lacs 9
- 3.2 Échantillonnage 11
- 3.3 Paramètres mesurés 13
- 3.4 Validation 15

IV. VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PHYSICO-CHIMIE DES LACS DE LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS 19
- 4.1 pH 19
- 4.2 Alcalinité 22
- 4.3 Sulfates 25
- 4.4 Conductivité 26
- 4.5 Somme des concentrations de calcium et de magnésium 30
- 4.6 Manganèse et aluminium dissous 33
- 4.7 Carbone organique total - couleur - tannins + lignines . 35
- 4.8 Synthèse des observations 37

V. TRAITEMENT STATISTIQUE 43
5.1 Analyse de corrélation 43
5.2 Analyse multivariée 50
5.2.1 Classification des lacs de la région de l'Outaouais 51
5.2.2 Comparaison des lacs de l'Outaouais avec la classification des lacs de la région de Rouyn-Noranda 63
5.2.3 Synthèse des analyses multivariées 68
5.3 Analyse discriminante 70

VI. MODÈLES 77
6.1 Modèle de Kramer et Tessier 77
6.2 Nomogramme de classification des lacs 81
6.3 Modèle de Brosset 88

VII. CONCLUSION 95

VIII. RECOMMANDATIONS 99

- BIBLIOGRAPHIE 101

- ANNEXES .....

LISTE DES TABLEAUX

III.1 Liste des paramètres physico-chimiques mesurés à partir des échantillons d'eau recueillis dans les différents types de bouteilles utilisées sur le terrain 12

III.2 Liste des paramètres physico-chimiques, ainsi que des méthodes d'analyse utilisées par le laboratoire du ministère de l'Environnement du Québec 14

V.1 Détails des liens de corrélation de Spearman, significatifs au niveau $\alpha = 0,01$, pour 81 lacs de la région de l'Outaouais 45

V.2 Valeurs des seuils utilisés pour chaque variable lors de la codification des données de 81 lacs des secteurs du Pontiac-Témiscamingue Sud, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant 54

V.3 Contributions relatives cumulées des points-paramètres dans l'étude de la physico-chimie des lacs des secteurs du Pontiac-Témiscamingue Sud, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant 56

V.4 Synthèse des caractéristiques des classes de lacs formées par la classification ascendante hiérarchique 60

V.5 Valeurs des seuils utilisés pour chaque variable dans la codification des données observées dans les lacs de la région de Noranda 65

LISTE DES TABLEAUX

(suite)

V.6 Association des lacs de l'Outaouais aux groupements définis par la classification ascendante hiérarchique des lacs de la région de Rouyn-Noranda et présentation des principales caractéristiques physico-chimiques de ces groupements 66

V.7 Présentation des coefficients des fonctions discriminantes associés à l'analyse discriminante de la physico-chimie des lacs de la région de l'Outaouais, selon la nature de la géologie du bassin versant 73

VI.1 Comparaison des concentrations relatives de HCO_3^-, de SO_4^{--} et d'anions organiques de divers échantillons d'eau recueillis en Amérique du Nord 86

VI.2 Détermination de l'influence des sulfates sur le niveau d'acidité des lacs associés aux groupements définis par la CAH et aux secteurs étudiés, selon le modèle de Brosset (1979) 92

LISTE DES FIGURES

II.1 Localisation de la région à l'étude (région de l'Outaouais: secteurs du Pontiac-Témiscamingue Sud, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant 6

III.1 Localisation des lacs échantillonnés dans la région de l'Outaouais 10

III.2 Présentation des cibles de validation des données physico-chimiques de 81 lacs de l'Outaouais, tenant compte ou non de la contribution des acides faibles 16

IV.1 Variabilité spatiale du pH dans la région de l'Outaouais 21

IV.2 Variabilité spatiale des valeurs d'alcalinité totale dans la région de l'Outaouais 24

IV.3 Variabilité spatiale des concentrations de sulfates dans la région de l'Outaouais 27

IV.4 Variabilité spatiale de la conductivité dans la région de l'Outaouais 29

IV.5 Variabilité spatiale de la somme des concentrations de calcium et de magnésium dans la région de l'Outaouais .. 32

IV.6 Variabilité spatiale des concentrations de manganèse total dans la région de l'Outaouais 34

LISTE DES FIGURES
(suite)

IV.7 Variabilité spatiale des concentrations en aluminium dissous dans la région de l'Outaouais 36

IV.8 Variabilité spatiale des concentrations de carbone organique total dans la région de l'Outaouais 38

IV.9 Variabilité spatiale des concentrations de tannins + lignines dans la région de l'Outaouais 39

IV.10 Variabilité spatiale des valeurs de couleur dans la région de l'Outaouais 40

V.1 Histogramme des liens de corrélation de Spearman calculés à partir des données physico-chimiques des lacs de la région de l'Outaouais 46

V.2 Classification arborescente de 81 lacs de la région de l'Outaouais définie par la classification ascendante hiérarchique 58

V.3 Représentation des points-paramètres (variables actives et supplémentaires) et des groupements de lacs définis par la CAH, selon les premier et deuxième axes factoriels 62

V.4 Comparaison selon les deux premiers axes factoriels de la distribution des lacs de l'Outaouais avec la classification des lacs de la région de Noranda 69

LISTE DES FIGURES
(suite)

V.5 Application de l'analyse discriminante à la physico-chimie des lacs de la région de l'Outaouais, selon la nature de la géologie du bassin versant 75

VI.1 Application du modèle de Kramer et Tessier (1982) selon les classes définies par la classification ascendante hiérarchique de 81 lacs de la région de l'Outaouais 80

VI.2 Présentation des 81 lacs de la région de l'Outaouais, selon un nomogramme de classification basé sur les concentrations relatives de bicarbonates, de sulfates et d'anions organiques 83

VI.3 Application du modèle de Brosset (1979) aux lacs appartenant à la région de l'Outaouais 90

VI.4 Estimation du nombre relatif de lacs dont le pH est inférieur à 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 et 6,5, selon l'augmentation ou la diminution des teneurs de sulfates 94

LISTE DES ANNEXES

1. Caractéristiques géologiques et niveau de vulnérabilité de 81 lacs de la région de l'Outaouais .....

2. Description des caractéristiques physiques de 81 lacs échantillonnés dans la région de l'Outaouais .....

3. Liste des données physico-chimiques de 81 lacs de la région de l'Outaouais .....

4. Représentation graphique des corrélations de Spearman supérieures à 0,60 .....

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier monsieur Marius Lachance de l'Institut national de la recherche scientifique (INRS-Eau), Monsieur John Haemmerli et mademoiselle Madeleine Papineau d'Environnement Canada et messieurs Yves Grimard, Yvon Richard et Lévis Talbot du ministère de l'Environnement du Québec pour leurs précieux conseils et leurs critiques pertinentes.

J'aimerais également souligner la contribution de l'équipe technique pour sa participation à l'échantillonnage et aux analyses de laboratoire, messieurs Rémi Lessard et André Dion pour la conception graphique des figures ainsi que tous ceux qui ont permis de mener à bien ce projet.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Le débat sur la problématique de l'impact des précipitations acides au Québec est déjà entamé depuis plusieurs années. En fait, l'attention portée à ce problème découle de deux facteurs importants. Tout d'abord, une grande partie du territoire québécois, en l'occurrence le bouclier canadien, repose sur des roches peu altérables dont la capacité à neutraliser la charge acide est très faible (Altshuller et McBean, 1979, 1980; Shilts et al. 1981; Kramer, 1981). Les lacs reposant sur de tels substrats sont généralement vulnérables à l'acidification. D'autre part, plusieurs chercheurs ont soulevé l'hypothèse que les apports atmosphériques acides pouvaient avoir de sérieuses répercussions sur la qualité de l'eau. Ainsi, Oden (1976) a émis l'hypothèse que les précipitations acides pouvaient abaisser la capacité de neutralisation des eaux lacustres, faire chuter le pH et faire augmenter la concentration en métaux lourds dans l'eau. D'autres chercheurs, dont Beamish (1976), Schofield (1976), Harvey et al. (1981) et Nero et Schindler (1983) ont soulevé la possibilité d'une baisse des populations de poissons, d'une augmentation du taux de mortalité, de l'extinction d'espèces peu tolérantes et d'une diminution de la diversité des espèces lors des processus d'acidification.

Par la suite, plusieurs études ont servi à déterminer les zones vulnérables du Québec. On peut mentionner les rapports de Legendre et al. (1980), de Grimard (1981), de Bobée et al. (1981, 1982, 1983) et de Langlois et al. (1984). Toutes ces études mettent en évidence la vulnérabilité d'une grande proportion de lacs du Québec. Ainsi, la région située entre le parc du Mont-Tremblant et la réserve faunique des Laurentides semble la plus sensible à l'acidification; cette zone a déjà fait l'objet de plusieurs études détaillées de la qualité de l'eau, des caractéristiques physiques des bassins et des communautés piscicoles tant au niveau de la variabilité spatiale, (Magnan, 1982; Richard, 1982; Dupont, 1984b) que de la variabilité temporelle (Ouellet et Jones, 1982; Dupont, 1985; Richard, 1985). D'autre part, les études réalisées à l'échelle du Québec ont mis en évidence une zone particulièrement affectée par les sulfates dans la région de la rivière des Outaouais.

Les concentrations de sulfates dans l'eau sont généralement considérées comme un indicateur des charges atmosphériques en SO_4. Ceci nous permet d'estimer le degré d'agression par les polluants anthropiques.

Dans la région de l'Outaouais, les concentrations moyennes de sulfates sont généralement supérieures à celles observées dans le reste du Québec (exception faite de la région de Noranda). Ainsi, Bobée et al. (1982, 1983) ont noté des concentrations de sulfates dépassant 150 µéq/l dans la majorité des lacs de cette région. En fait, Bobée et al. (1983) présentent des teneurs moyennes en SO_4 qui atteignent 193,0 µéq/l (± 34 pour cent[1]) pour 21 lacs de la région de l'Outaouais. Pour leur part, Langlois et al. (1984) obtiennent un chiffre moyen de 140,7 ± 50,2 µéq/l) de sulfates, à partir de 45 lacs de la région hydrographique "04". Cette valeur s'avère presque le double de la moyenne globale des 251 lacs qu'ils ont échantillonnés (78,0 ± 7,9 µéq/l de SO_4^{--}). Enfin, Dupont (1984a) a étudié l'influence des émissions d'anhydride sulfureux en provenance de Mines Noranda ltée sur la qualité de l'eau des lacs environnants. En excluant l'influence des rejets atmosphériques de SO_2 en provenance de Noranda, cet auteur note également une décroissance graduelle des teneurs en SO_4 à partir de la rivière des Outaouais, selon un axe sud-ouest nord-est. Près de la rivière des Outaouais, les concentrations de sulfates dépassent parfois 200 µéq/l.

Par sa situation géographique, la région hydrographique "04" qui inclut la région de l'Outaouais, discutée dans la présente étude, est en aval des vents en provenance de l'Ontario et des régions fortement industrialisées des États-Unis (Vallée de l'Ohio). Cette position particulière pourrait conférer à la région 04, un statut de zone de dépôts importants causés par des émissions transfrontalières (Talbot et Grimard, 1981). Pour la formulation d'une politique internationale sur le transport à grande distance des polluants aéroportés, il est dès lors important, pour le Québec, de bien connaître les impacts des précipitations acides dans cette partie de la province.

---

1 Coefficient de variation (écart-type/moyenne) exprimé en pourcentage.

Un autre intérêt a motivé le choix de la région de l'Outaouais. À ce jour, les efforts ont principalement porté sur l'étude de l'omble de fontaine (Salvelinus fontinalis). Comme cette espèce n'est pas reconnue comme étant la plus sensible aux effets de l'acidification, une étude spécifique effectuée dans la région 04 pourrait permettre d'étendre nos observations à d'autres espèces de poissons d'intérêt sportif, tel le touladi (Salvelinus namaycush) ou le doré jaune (Stizostedion vitreum). Toutefois, pour y parvenir, il est nécessaire d'obtenir des données physico-chimiques de base avant d'effectuer des études biologiques sur les espèces de poissons mentionnées précédemment.

Afin de répondre aux questions soulevées dans les paragraphes précédents, nous avons défini les objectifs suivants:

- établir avec plus de précision, l'influence des précipitations acides dans la région de l'Outaouais, en faisant ressortir l'apport important des précipitations acides et la variabilité spatiale de la qualité de l'eau de cette zone;

- obtenir les données physico-chimiques de base à une future étude de l'impact de l'acidification des eaux lacustres de la région sur la faune ichtyenne.

CHAPITRE II

DESCRIPTION DU MILIEU PHYSIQUE

Le territoire étudié se situe presque entièrement à l'intérieur du bassin hydrographique de la rivière des Outaouais (région hydrographique 04). Plus précisément, la région étudiée est comprise entre le 47e parallèle nord, la rivière des Outaouais, ainsi que les 74e et 79e méridiens ouest (figure II.1). En fait, notre attention s'est portée sur trois zones distinctes: 1- le secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud, 2- le secteur de Papineau-Labelle et 3- le secteur du parc du Mont-Tremblant. Tout d'abord, le secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud est limité au sud par la rivière des Outaouais, au nord, par le parallèle 46°40' nord, et à l'est, par le méridien 77° ouest. Le secteur de Papineau-Labelle est situé entre les parallèles 46°30' et 45°45' nord et entre les méridiens 75°30' et 74°45' ouest. Enfin, le secteur du parc du Mont Tremblant est compris entre les parallèles 46°15' et 47° nord, ainsi qu'entre les méridiens 75° et 74° ouest.

La plupart des bassins versants de la région étudiée sont situés sur le bassin hydrographique de la rivière des Outaouais. Seule une dizaine de lacs dérogent à cette règle. En fait, ces lacs sont localisés dans la partie nord-ouest du bassin versant des rivières L'Assomption et Saint-Maurice, soit juste à proximité du bassin hydrographique de la rivière des Outaouais.

Selon la classification de Grandtner (1966), la végétation caractérisant les zones étudiées serait associée au domaine de l'érablière à bouleau jaune. Toutefois, les endroits plus élevés en altitude feraient partie du domaine de la sapinière. La forêt est généralement de type mixte avec présence de nombreuses espèces de feuillus et de conifères (Société d'aménagement de l'Outaouais, 1976).

Plusieurs types pédologiques peuvent être observés dans la région de l'Outaouais, mais les principaux types de sols sont caractérisés par les

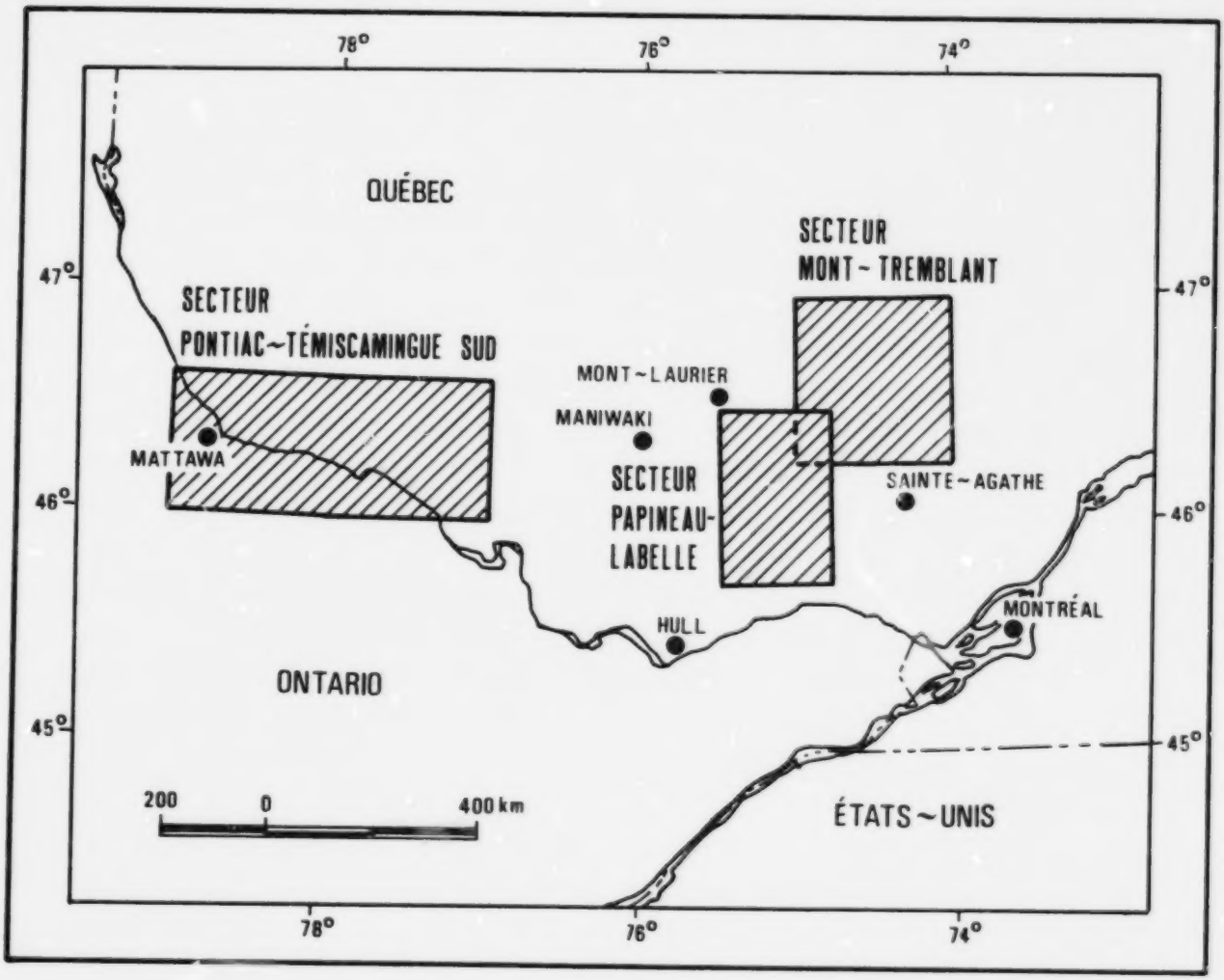


Figure II.1 Localisation de la région à l'étude (région de l'Outaouais: secteurs du Pontiac-Témiscamingue Sud, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant).

podzols humo-ferriques et les brunisols dystriques (Clayton et al., 1978).

La géologie de la roche-mère ainsi que la composition et l'épaisseur des dépôts superficiels comptent parmi les facteurs qui influencent le plus la qualité de l'eau et le degré de minéralisation des eaux lacustres (Dupont, 1984a, 1984b). Ainsi, au point de vue géologique, la région étudiée est entièrement située sur le bouclier canadien, et plus précisément, sur les roches précambriennes de la province géologique de Grenville. Toutefois, la nature lithologique est très variable d'un endroit à l'autre.

En fait, des roches à caractère granitoïde, gneissique ou métasédimentaire sont parfois observées ensemble sur un même bassin versant. C'est pour cette raison qu'aucune carte géologique n'est présentée dans ce rapport, le niveau de détail étant très élevé. Par contre, l'annexe "1" présente une synthèse des types géologiques observés sur chacun des 81 bassins versants étudiés. Cette synthèse a été élaborée à partir des rapports géologiques de Pollock (1956, 1957, 1960, 1961), Duesing (1961), Rive (1970, 1973, 1974), Katz (1976), Avramtchev et Marcoux (1980) et Shilts et al. (1981). En général, les roches sont peu altérables et leur capacité à neutraliser la charge acide est assez faible. Néanmoins, nous avons déterminé trois niveaux de vulnérabilité, selon les résultats obtenus par Shilts et al. (1981) et Dupont (1984a, 1984b, 1985). Ainsi les roches granitoïdes et les gneiss, contenant une forte proportion de minéraux foncés, sont généralement associées à des eaux lacustres très faiblement minéralisées et à une faible capacité à neutraliser la charge acide. Un deuxième niveau de vulnérabilité est associé aux roches métasédimentaires leucocrates et aux roches alcalines. Les gneiss, les paragneiss, les gabbros et les anorthosites appartiennent à ce groupe. Enfin, le niveau de faible vulnérabilité à l'acidification est associé aux roches de la série de Grenville dont le calcaire cristallin (marbre) fait partie.

La pyrite et les autres sulfures métalliques peuvent contribuer significativement aux concentrations totales de sulfates observées dans les lacs, mais dans la région de l'Outaouais, la majorité des rapports

géologiques ne font mention de ces éléments, qu'à l'état de traces. Cette information suggère que la contribution naturelle de sulfates en provenance du bassin versant devrait être relativement faible sur l'ensemble de la région étudiée. Par contre, Pollock (1956, 1957) note que les roches de la série de Grenville (faible vulnérabilité à l'acidification) contiennent parfois des teneurs importantes de pyrite, lesquelles pourraient avoir une influence significative sur les concentrations totales de SO_4 (voir annexe 1).

Peu d'informations sont disponibles sur la nature des dépôts meubles de la région de l'Outaouais. Toutefois, selon le rapport de Shilts et al. (1981), la majorité des dépôts superficiels de la région seraient constitués de till glaciaire. De plus, certains tills contenant des éléments carbonatés provenant de l'érosion glaciaire des roches de la série de Grenville (marbre) seraient situés près de Maniwaki (Figure II.1). Ces derniers pourraient influencer la physico-chimie des lacs du secteur de Papineau-Labelle (zone 2) et du sud-est du secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud (zone 1).

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Les lacs de la région de l'Outaouais ont été échantillonnés de façon à déterminer l'influence des dépôts d'anhydride sulfureux et des sulfates sur la qualité de l'eau. Tout d'abord, 36 lacs furent choisis dans la zone immédiate au nord de la rivière des Outaouais (sud du Pontiac-Témiscamingue). Cette zone est la plus proche des sources potentielles d'émission d'anhydride sulfureux. Deuxièmement, 17 lacs furent échantillonnés dans le secteur de Papineau-Labelle et finalement, 29 autres lacs ont été visités dans le secteur du parc du Mont-Tremblant.

Par la suite, nous avons décidé de traiter conjointement les 82 lacs visités dans les trois secteurs décrits précédemment. Pour en arriver là, il a fallu faire l'hypothèse que les trois secteurs n'étaient pas significativement différents. En fait, les secteurs du Pontiac-Témiscamingue Sud, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant ont plusieurs points en commun. Ils appartiennent tous à la région physiographique des hautes-terres laurentiennes. Ils sont également tous associés à la province géologique de Grenville, ce qui implique une similitude au niveau du type et de l'âge des roches. De plus, à l'exception d'une dizaine de lacs, les trois zones étudiées sont comprises à l'intérieur de la région hydrographique 04 (bassin hydrographique de la rivière des Outaouais). Outre ces facteurs, on note également des similitudes au niveau du climat, de la pédologie et de la végétation.

3.1 SÉLECTION DES LACS

Les 82 lacs ont été sélectionnés sur carte topographique et tous ont été échantillonnés. La localisation de ces lacs est présentée à la figure III.1. La description de leurs caractéristiques physiques est également présentée à l'annexe 2.

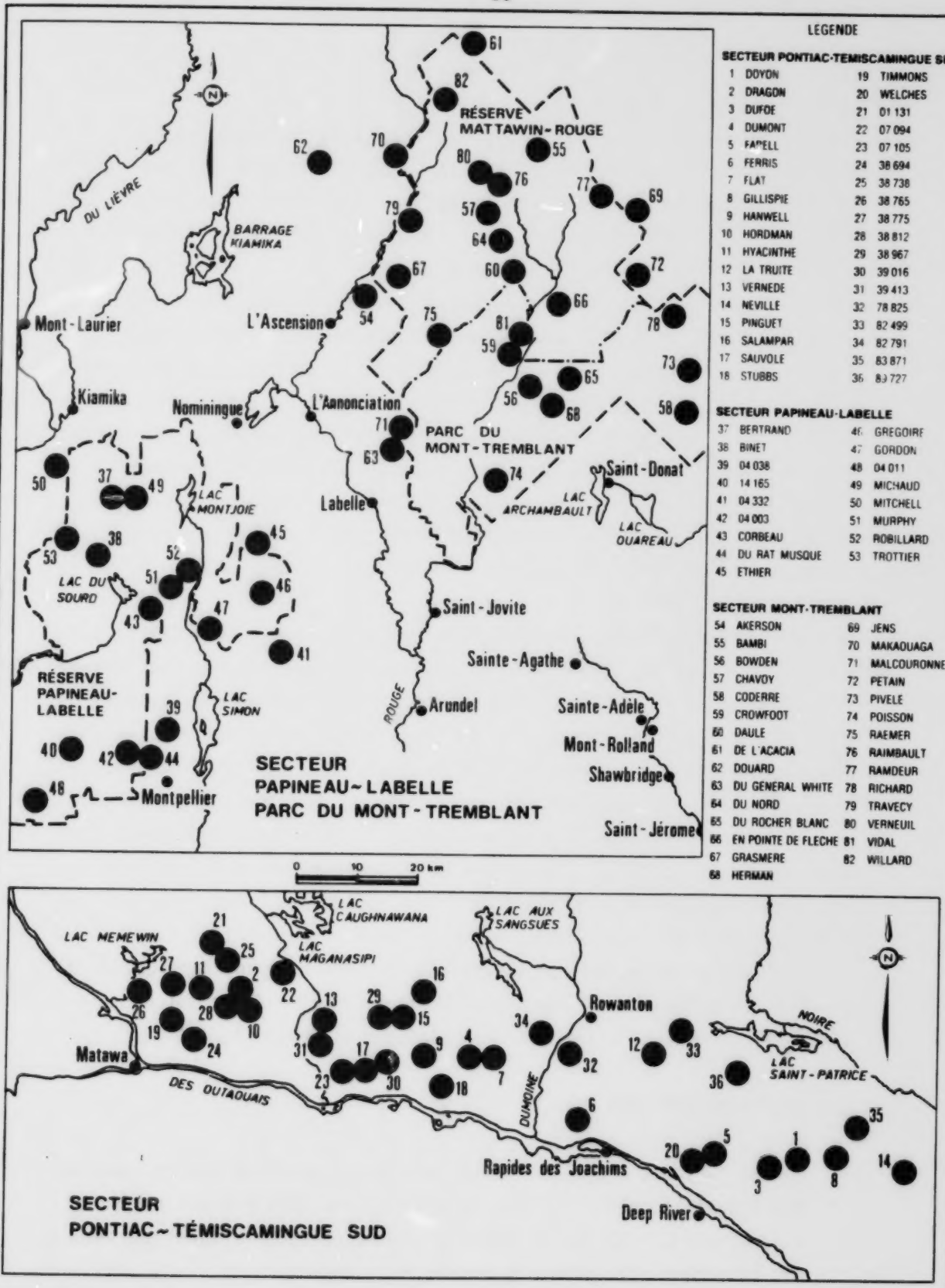


Figure III.1 Localisation des lacs échantillonnés dans la région de l'Outaouais

Les lacs choisis devaient être des lacs de tête dont le bassin versant n'était pas visiblement perturbé par l'activité humaine. Les lacs organiques et les marécages n'étaient pas considérés. Afin de répondre aux besoins de la logistique, il était préférable que les lacs choisis aient une longueur supérieure ou égale à un kilomètre et une largeur supérieure à 250 mètres.

3.2 ÉCHANTILLONNAGE

Les lacs ont été échantillonnés entre le 16 et le 30 mars 1983, sous un couvert de glace. Cette période facilite la comparaison interlacs à cause de la stabilité des régimes hydrologique et hydrobiologique. L'échantillonnage a été réalisé conformément aux procédures en vigueur à la Direction des relevés aquatiques du ministère de l'Environnement du Québec (Grimard, 1982). Par ailleurs, les mesures de pH sur le terrain ont été effectuées par l'intermédiaire d'un pHmètre portatif (radiometer Copenhagen PHM80) sur un aliquot de l'échantillon intégré. Les profils de température et d'oxygène dissous ont été réalisés avec l'aide d'un hydrolab digital 4041, conformément à la méthode décrite dans Potvin (1981).

Le détail du protocole d'échantillonnage est le même que celui décrit dans le rapport de Dupont (1984a). Toutefois, il faut mentionner que trois bouteilles (deux bouteilles de polyéthylène de 125 ml et une bouteille de polyéthylène de 1000 ml) ont servi à recueillir les échantillons d'eau en vue des différentes analyses de laboratoire. Ainsi, après le remplissage d'une bouteille neuve de 125 ml, 0,5 ml HNO_3 50:50 y a été ajouté sur le terrain en vue de l'analyse portant sur les métaux. Dans une deuxième bouteille de 125 ml, 0,5 ml de H_2SO_4 8N était ajouté sur le terrain en vue de l'analyse portant sur les nutriments. Enfin, aucun préservatif n'a été ajouté à la bouteille de 1000 ml. La liste des paramètres analysés à partir de l'échantillon d'eau contenu dans chacune des bouteilles est présentée au tableau III.1

TABLEAU III.1: Liste des paramètres physico-chimiques mesurés à partir des échantillons d'eau recueillis dans les différents types de bouteilles utilisées sur le terrain.

TYPE DE BOUTEILLE	ANALYSE	IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES	PRÉSERVATIF AJOUTÉ À L'ÉCHANTILLON
125 ml	nutriments	nitrates + nitrites, azote ammoniacal, azote Kjeldahl, phosphore total;	0,5 ml H_2SO_4 8N
125 ml	métaux	fer, manganèse, calcium, magnésium, sodium, potassium;	0,5 ml HNO_3 50:50 (dans une bouteille neuve lavée)
1000 ml	autres	conductivité, turbidité, couleur vraie, pH, tannins + lignines, carbone inorganique total, carbone total, alcalinité, fluorures, aluminium dissous[1], sulfates, chlorures, acides forts (H^+)[2];	aucun préservatif

1: L'aluminium a été filtré au laboratoire
2: Les acides forts étaient mesurés lorsque l'alcalinité était nulle ou négligeable

Lors de l'échantillonnage, l'accent a été mis sur l'acheminement rapide des échantillons au Laboratoire de Québec, lesquels étaient maintenus à la noirceur et conservés à 4 °C dans la neige fondante. La détermination du pH et de l'alcalinité était réalisée moins de 24 heures après l'échantillonnage. Pour les autres paramètres, le délai d'analyse se situe à l'intérieur du délai maximum fixé par le laboratoire du ministère de l'Environnement du Québec pour conserver l'intégrité de l'échantillon.

3.3 PARAMÈTRES MESURÉS

Le choix des paramètres à mesurer a été fait de façon à obtenir un tableau complet de la physico-chimie des lacs. Ainsi, le pH, l'alcalinité, les sulfates et les acides forts ont été analysés dans le but de définir le niveau d'acidité et le degré d'agression des lacs par les acides forts. D'autre part, plusieurs paramètres liés à la minéralisation et à la productivité des eaux lacustres ont été retenus pour l'étude: le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, la conductivité, la turbidité, les nitrates + nitrites, l'azote ammoniacal, l'azote Kjeldahl, le phosphore total, les chlorures, le carbone total et le carbone inorganique total. Parmi les métaux lourds, le fer total, le manganèse total et l'aluminium dissous ont été mesurés dans le but de déterminer l'influence de l'acidité et la présence de matière organique sur leurs concentrations. L'aluminium dissous est particulièrement important, en raison de sa toxicité à faible pH. Parmi les autres paramètres physico-chimiques considérés, la couleur vraie et les tannins + lignines ont été mesurés afin d'estimer l'influence des substances humiques et organiques sur la qualité de l'eau. Finalement quelques variables physiques, tels la profondeur, l'altitude, la température de l'eau, l'oxygène dissous etc., ont été considérées dans le but de dégager l'influence du milieu physique.

La liste des paramètres mesurés et des méthodes d'analyse utilisées par le Laboratoire du ministère de l'Environnement du Québec est présentée au tableau III.2. Les données brutes validées sont également présentées à l'annexe 3.

TABLEAU III.2: Liste des paramètres physico-chimiques, ainsi que des méthodes d'analyse utilisées par le Laboratoire du ministère de l'Environnement du Québec.

PARAMÈTRE	UNITÉ	MÉTHODE ANALYTIQUE [2]	LIMITE DE DÉTECTION
Acides forts (H^+)	µéq/l	Titration conductivimétrique par l'hydroxyde de sodium	2 µéq/l
pH	unité	Électrométrie	0,1 unité
Couleur vraie	hazen	Dosage colorimétrique automatisé (400 µm)	1 hazen
Tannins + lignines	mg/l Tan	Dosage colorimétrique automatisé	0,1 mg/l
Sulfates	mg/l SO_4	Dosage colorimétrique automatisé	0,5 mg/l
Fluorures	mg/l F	Dosage colorimétrique automatisé	0,04 ng/l
Nitrates + nitrites	mg/l N	Dosage colorimétrique automatisé	0,02 mg/l
Azote ammoniacal	mg/l N	Dosage colorimétrique automatisé	0,02 mg/l
Azote kjeldahl	mg/l N	Dosage colorimétrique automatisé	0,02 mg/l
Phosphore total	mg/l P	Dosage colorimétrique automatisé	0,006 mg/l
Alcalinité	mg/l $CaCO_3$	Titration conductivimétrique par l'acide nitrique	0,1 mg/l
Chlorures	mg/l Cl	Titration conductivimétrique par le nitrate de mercure	0,1 mg/l
Turbidité	U.T.N.	Néphélométrie	0,1 U.T.N.
Conductivité	µS/cm	Conductivimétrie	0,5 µS/cm
Carbone total	mg/l C	Combustion et infrarouge	0,5 mg/l
Carbone inorganique total	mg/l C	Combustion et infrarouge	0,5 mg/l
Manganèse total	mg/l Mn	Plasma	0,01 mg/l
Fer total	mg/l Fe	Plasma	0,02 mg/l
Calcium total	mg/l Ca	Plasma	0,1 mg/l
Magnésium total	mg/l Mg	Plasma	0,1 mg/l
Sodium total	mg/l Na	Plasma	0,1 mg/l
Potassium total	mg/l K	Plasma	0,1 mg/l
Aluminium dissous[1]	mg/l Al	Plasma	0,02 mg/l

1: l'aluminium dissous a été filtré au laboratoire

2: communication personnelle de Marcel Faucher, Direction des laboratoires, ministère de l'Environnement du Québec.

3.4 VALIDATION

Les données ont été validées selon deux méthodes. Tout d'abord, nous avons appliqué une validation objective qui consiste à vérifier chacune des données centrées-réduites, dont la valeur est supérieure ou inférieure à trois écarts-types de l'échantillon. Par la suite, nous avons réalisé un filtrage physico-chimique basé sur le bilan ionique des ions majeurs. Cette opération est effectuée avec l'aide d'une cible de validation combinant l'usage de l'écart entre la somme des cations et des anions (l'écart ionique), ainsi que de l'écart entre la conductivité mesurée et la conductivité reconstituée (l'écart de conductivité) (Dupont, 1984a). L'usage combiné des deux types d'écart permet de définir quatre secteurs d'intérêt: les anions surestimés, les anions sous-estimés, les cations surestimés et les cations sous-estimés. La présence d'une observation sur l'un de ces quatre secteurs permet de savoir s'il y a déficience ou excès de cations ou d'anions.

La partie A de la figure III.2 présente une cible de validation où le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, l'azote ammoniacal, les acides forts ($[H^+]$), les bicarbonates, les sulfates, les chlorures et les nitrates + nitrites sont considérés. Toutefois, les nitrates + nitrites et l'azote ammoniacal ne contribuent que faiblement à la somme des anions et à la somme des cations. Selon la figure III.2, 22 pour cent des lacs présentent un écart ionique supérieur à 25 pour cent. Cependant, la majorité de ces lacs se positionnent dans le secteur des anions sous-estimés. Ce comportement laisse croire qu'un certain type d'anions, non mesuré sur le terrain, participerait de façon significative au bilan ionique. Nous croyons que les anions provenant de la dissociation des acides faibles pourraient combler cette déficience en anions.

Afin de vérifier l'importance des acides faibles, nous avons utilisé l'équation empirique développée par Webb (1982) et qui sert au calcul des concentrations totales en acides faibles (fraction organique

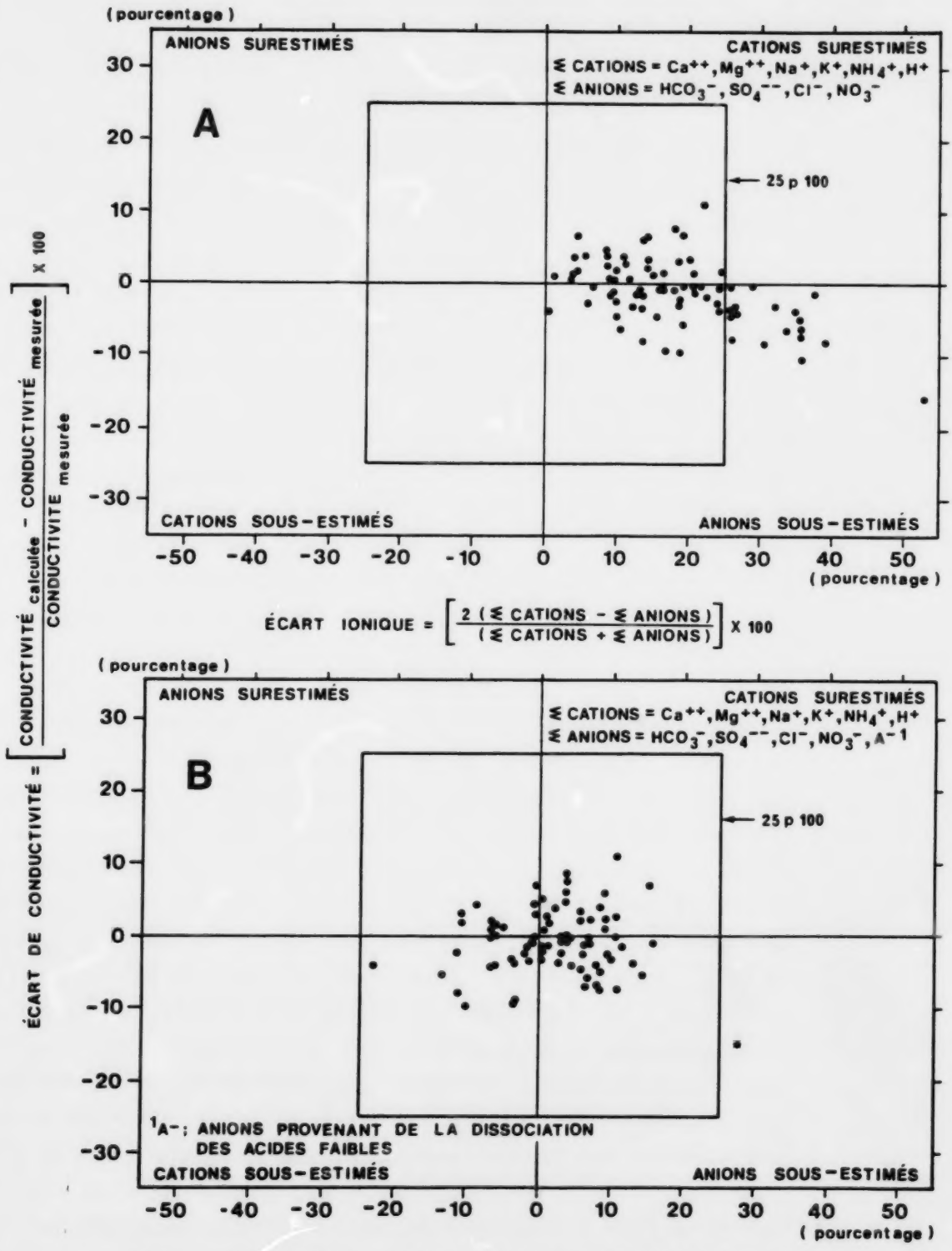


Figure III.2 Présentation des cibles de validation des données physico-chimiques de 81 lacs de l'Outaouais, tenant compte ou non de la contribution des acides faibles.

+ inorganique). Cet auteur a basé son équation sur les contributions en acides faibles associées à l'aluminium, au carbone organique total, à l'azote ammoniacal et à la silice activée:

$$[AF] = 4{,}75\,[COT] + 148\,[Al] + 71\,[NH_4] + 13{,}31\,[SiO_2]$$

où [AF] = concentration totale en acides faibles (µéq/l)
[COT] = concentration de carbone organique total (mg/l C)
[Al] = concentration d'aluminium (mg/l Al)
[NH_4] = concentration d'azote ammoniacal (mg/l N)
[SiO_2] = concentration de silice activée (mg/l Si)

Selon ce modèle, chaque milligramme de COT contribue à 4,75 µéq/l d'acide fulvique (acide faible organique). Par ailleurs, les concentrations d'aluminium, d'azote ammoniacal et de silice activée donnent un estimé des teneurs en acides faibles de nature inorganique.

En raison de l'absence de données sur la silice activée, nous n'avons pu déterminer la fraction d'acides faibles qui est associée à cette variable. Néanmoins, nous avons appliqué l'équation en étant conscient de cette lacune. La figure III.2-b présente une cible de validation considérant chacun des ions majeurs décrits précédemment, ainsi que la contribution des anions provenant de la dissociation des acides faibles (organiques + inorganiques) estimée empiriquement. L'addition des acides faibles améliore grandement la distribution des écarts. En fait, la presque totalité des lacs présente maintenant des écarts inférieurs à 25 pour cent. Il n'existe qu'une exception à cette règle, laquelle peut être attribuée à une valeur aberrante de sulfates.

Un seul lac (numéro 29) fut éliminé de l'étude statistique (voir page 21), en raison d'un niveau de couleur (130 unités hazen) trop élevé comparativement aux autres lacs.

CHAPITRE IV

VARIABILITÉ SPATIALE DE LA PHYSICO-CHIMIE DES LACS DE LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS

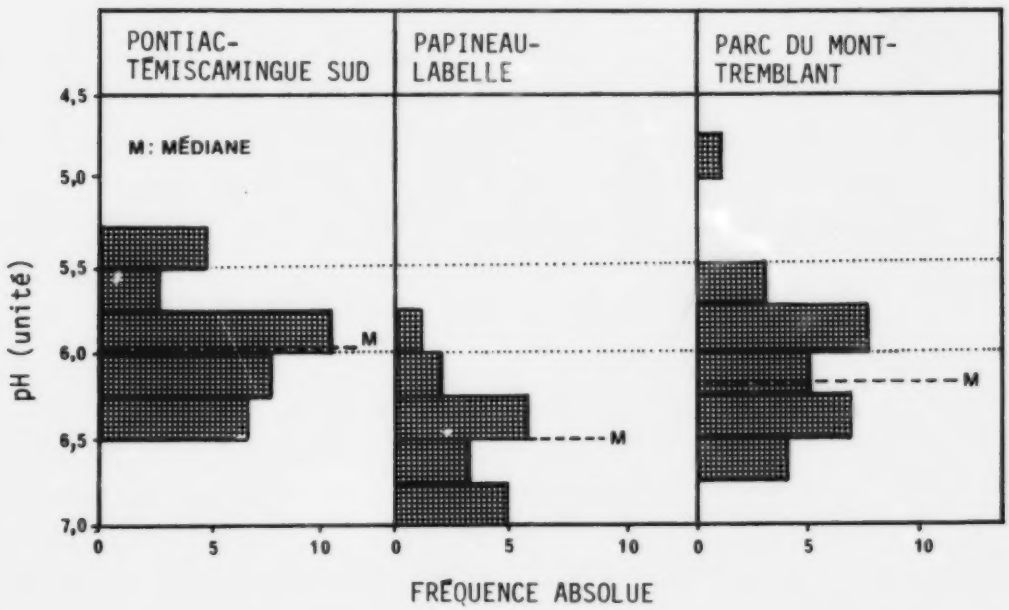
Dans la présente section, nous traitons particulièrement de la variabilité spatiale de la physico-chimie des lacs des secteurs du Pontiac-Témiscamingue Sud, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant. Les paramètres suivants ont été considérés: le pH (mesuré en laboratoire), l'alcalinité, les sulfates, la conductivité, le calcium, le manganèse, l'aluminium, le carbone organique total, les tannins + lignines et la couleur vraie.

4.1 pH

Le pH est un paramètre intégrateur de plusieurs réactions chimiques. Ainsi, l'oxydation de l'ammoniaque et des sulfures métalliques peut accroître la concentration en ions hydrogène. Les réactions d'hydrolyse et d'échange ionique peuvent avoir un rôle similaire (Dickson, 1980). D'autre part, les réactions alcalifiantes, telles que l'altération de la roche en place, la réduction des nitrates et des sulfates et certains échanges ioniques, peuvent hausser le pH. Outre la production naturelle d'ions hydrogène, il faut également ajouter les apports acides par les précipitations.

Comparativement aux lacs alcalins, le pH s'avère généralement plus faible lorsque les valeurs d'alcalinité et de cations majeurs sont peu élevées. De plus, le pH peut également être plus faible dans les lacs riches en acides faibles. D'autre part, pour ce paramètre on note de fortes variations saisonnières. Par exemple, pour les lacs du centre de l'Ontario, Jeffries et al. (1979) ont noté une baisse de pH pendant la fonte nivale. Dans le cas de certains de ces lacs, une baisse de 1,3 unité de pH fut observée.

À la figure IV.1, nous présentons la distribution des valeurs de pH des lacs associés aux trois secteurs étudiés, tandis qu'à la figure ci-dessous, nous présentons les fréquences absolues de lacs, associées à chaque intervalle de pH:



Selon cette figure, le secteur du Pontiac-Témiscamingue compte un plus grand pourcentage de lacs dont le pH est inférieur à 5,5, que les deux autres zones, bien que la géologie des bassins versants de ces lacs soit comparable à celle des lacs du secteur du parc du Mont-Tremblant, où le pH est généralement plus élevé et où la conductivité et la somme des cations sont inférieures ou similaires. Toutefois, le secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud est le plus rapproché des secteurs industrialisés de l'Ontario et des États-Unis. D'autre part, le secteur de Papineau-Labelle constitue un cas particulier. La majorité des lacs de ce secteur présente un pH supérieur à 6,0, en raison de la présence de roches et de dépôts carbonatés sur leur bassin versant.

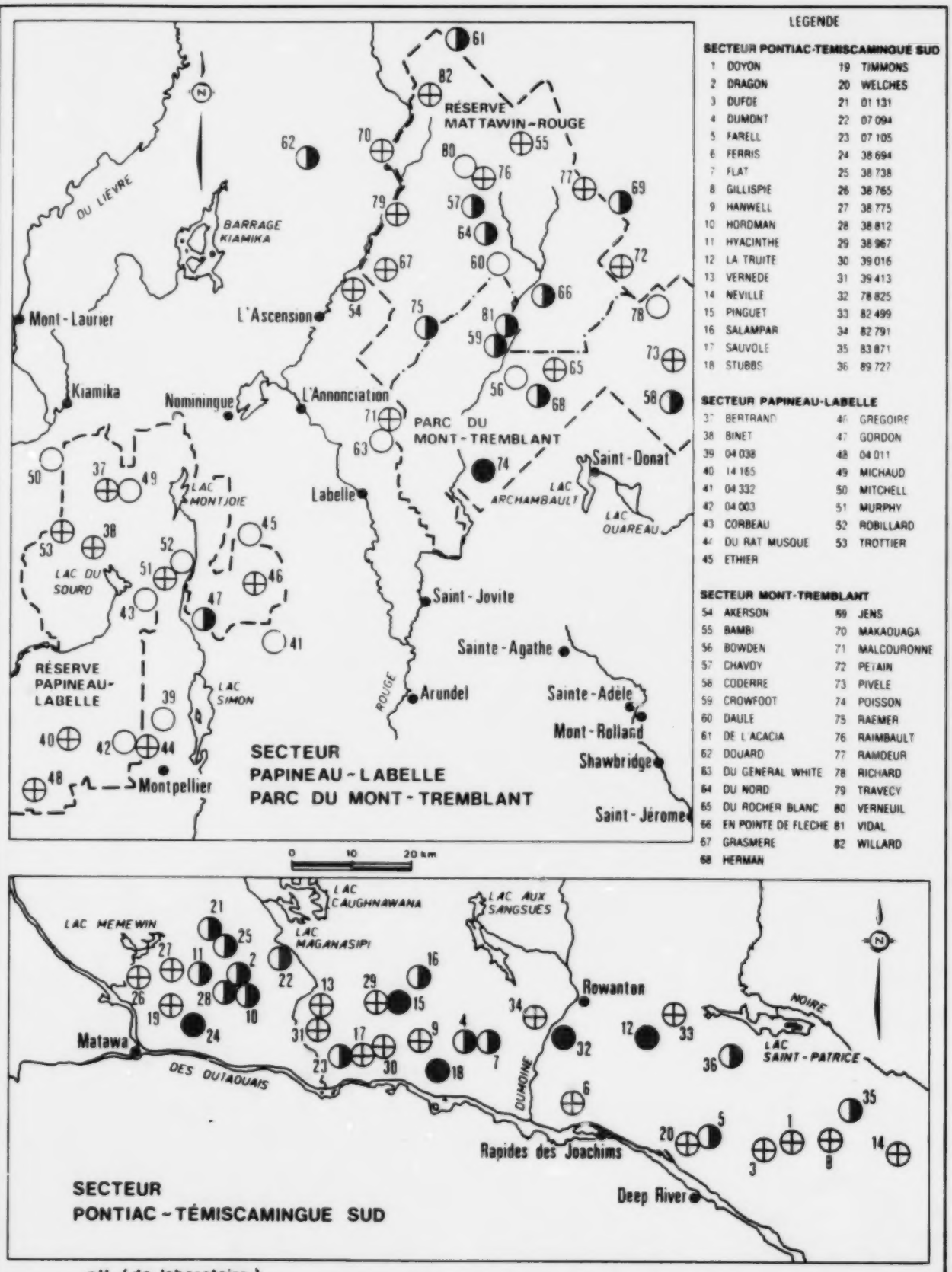


Figure IV.1 Variabilité spatiale du pH dans la région de l'Outaouais.

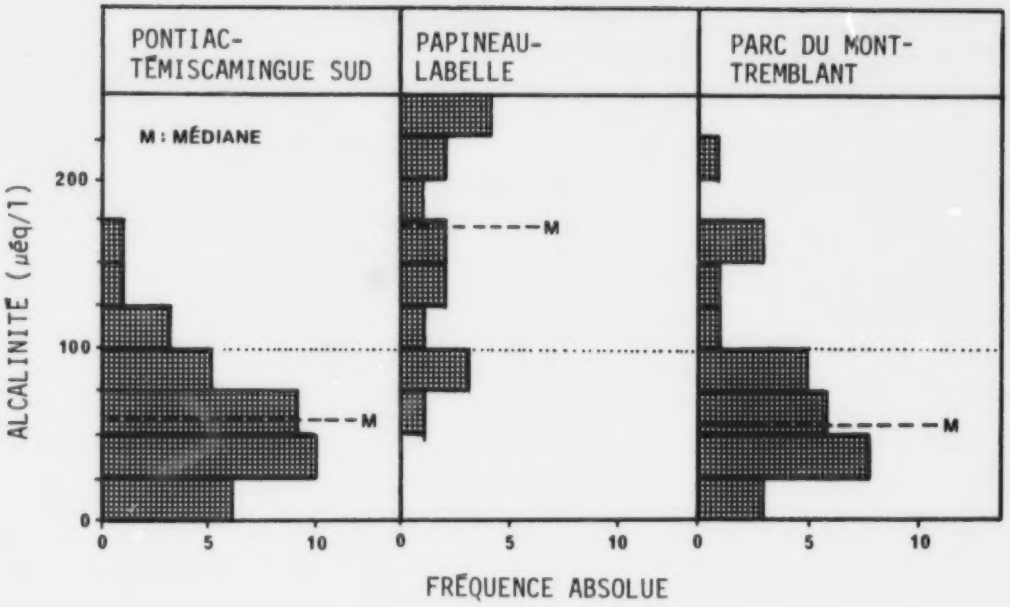
4.2 ALCALINITÉ

L'alcalinité est considérée comme un indice important de la sensibilité d'un lac à l'acidification par les acides forts. Cette variable permet d'estimer la quantité d'ions H^+ pouvant être neutralisée avant que le pH atteigne le point d'équivalence où les concentrations d'ions H^+ et de bicarbonates sont égales. Un pH inférieur au point d'équivalence implique alors la perte de l'alcalinité due aux bicarbonates.

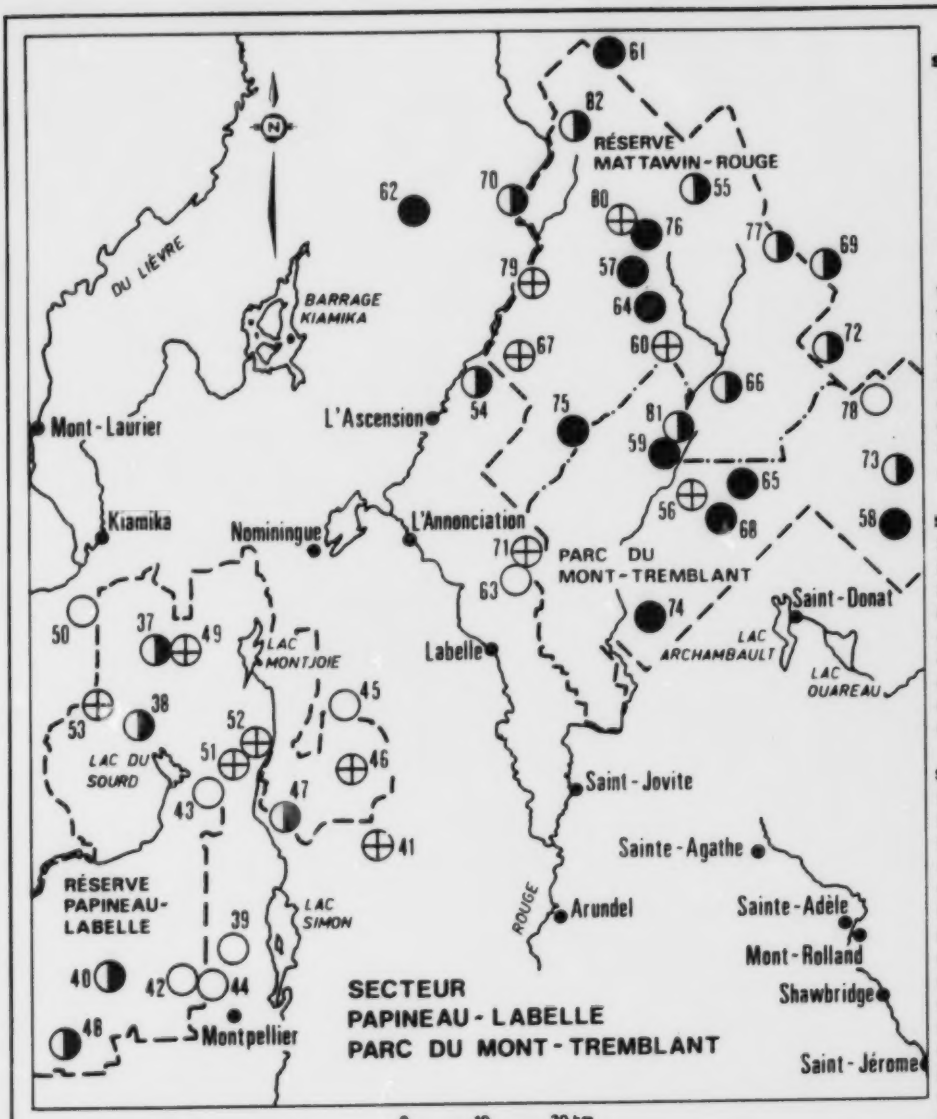
L'alcalinité est généralement associée aux espèces carbonatées provenant de l'altération chimique de la roche en place ou du CO_2 atmosphérique. Selon Altshuller et McBean (1980), le seuil de sensibilité extrême attribué à l'alcalinité serait inférieur à 200 µéq/l. D'autres scientifiques, par exemple Glass et al. (1980) établissent leur seuil de sensibilité extrême à 100 µéq/l d'alcalinité. Ce dernier seuil nous semble plus réaliste et sera utilisé pour la discussion qui suit.

À la figure IV.2, nous présentons la distribution spatiale de l'alcalinité dans les trois secteurs de la région de l'Outaouais. Plus de 69 pour cent des lacs de ces secteurs affichent un seuil de sensibilité extrême à l'acidification si l'on considère le seuil critique d'alcalinité égal à 100 µéq/l.

Au niveau des secteurs, le Pontiac-Témiscamingue et le parc du Mont-Tremblant affichent un comportement similaire. En fait, selon la figure suivante, les fréquences absolues de lacs associées à chaque intervalle de concentration sont du même ordre pour ces deux secteurs:



Toutefois, le nombre de lacs présentant de faibles valeurs d'alcalinité (< 100 µéq/l) est légèrement plus élevé dans le Pontiac-Témiscamingue. D'autre part, dans ce secteur, la population de lacs dont l'alcalinité est inférieure à 50 µéq/l est moins élevée à l'est de Rowanton. Cette disparité peut être expliquée par la présence d'éléments carbonatés dans les tills recouvrant les roches peu altérables de cette zone. Finalement, les lacs du secteur de Papineau-Labelle présentent des valeurs d'alcalinité particulièrement élevées, en raison de la nature géologique des substrats. Ces lacs seraient moins vulnérables aux apports anthropiques de sulfates.



LEGENDE

SECTEUR PONTIAC-TÉMISCAMINGUE SUD

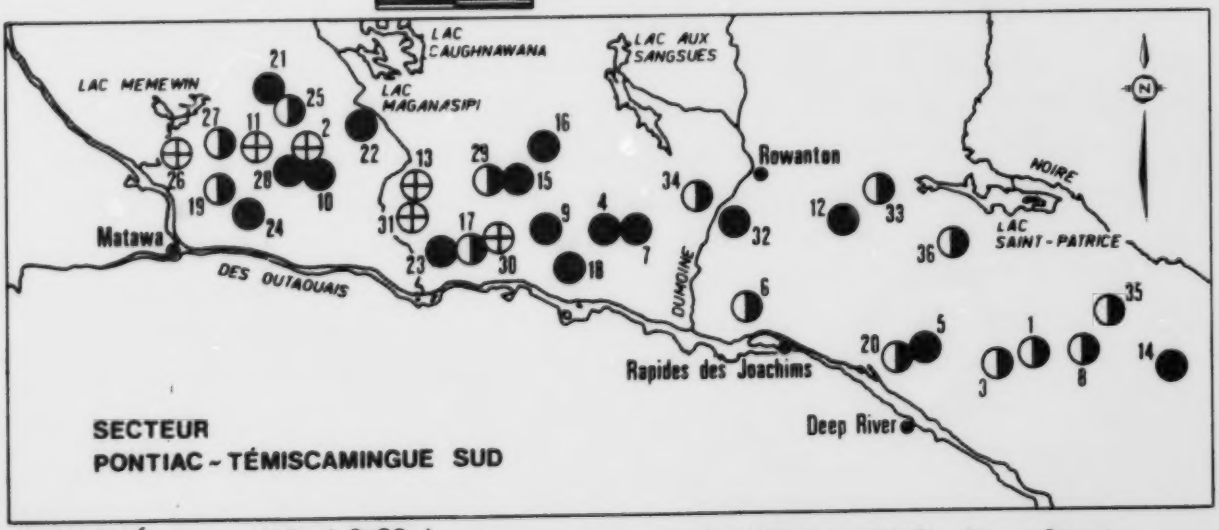
1	DOYON	19	TIMMONS
2	DRAGON	20	WELCHES
3	DUFOE	21	01 131
4	DUMONT	22	07 094
5	FARELL	23	07 105
6	FERRIS	24	38 694
7	FLAT	25	38 738
8	GILLISPIE	26	38 765
9	HANWELL	27	38 775
10	HORDMAN	28	38 812
11	HYACINTHE	29	38 967
12	LA TRUITE	30	39 016
13	VERNEDE	31	39 413
14	NEVILLE	32	78 825
15	PINGUET	33	82 499
16	SALAMPAR	34	82 791
17	SAUVOLE	35	83 871
18	STUBBS	36	89 727

SECTEUR PAPINEAU-LABELLE

37	BERTRAND	46	GREGOIRE
38	BINET	47	GORDON
39	04 038	48	04 011
40	14 165	49	MICHAUD
41	04 332	50	MITCHELL
42	04 003	51	MURPHY
43	CORBEAU	52	ROBILLARD
44	DU RAT MUSQUE	53	TROTTIER
45	ETHIER		

SECTEUR MONT-TREMBLANT

54	AKERSON	69	JENS
55	BAMBI	70	MAKAOUAGA
56	BOWDEN	71	MALCOURONNE
57	CHAVOY	72	PETAIN
58	CODERRE	73	PIVELE
59	CROWFOOT	74	POISSON
60	DAULE	75	RAEMER
61	DE L'ACACIA	76	RAIMBAULT
62	DOUARD	77	RAMDEUR
63	DU GENERAL WHITE	78	RICHARD
64	DU NORD	79	TRAVECY
65	DU ROCHER BLANC	80	VERNEUIL
66	EN POINTE DE FLECHE	81	VIDAL
67	GRASMERE	82	WILLARD
68	HERMAN		



ALCALINITÉ (µéq/l $CaCO_3$)

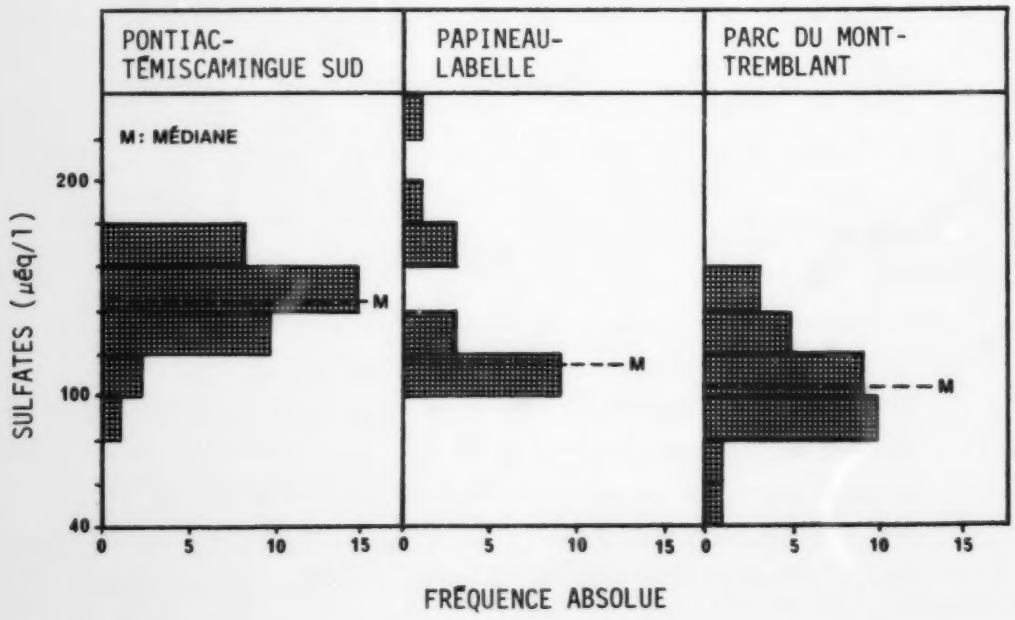
- ● ≤ 50
- ◑ 50 - 100
- ⊕ 100 - 200
- ○ > 200

Figure IV.2 Variabilité spatiale des valeurs d'alcalinité dans la région de l'Outaouais.

4.3 SULFATES

Les sulfates sont considérés comme étant un indice important des effets du transport des polluants atmosphériques sur la qualité de l'eau. Selon Altshuller et McBean (1980), cet élément serait conservateur, c'est-à-dire qu'il ne s'accumulerait pas dans le bassin versant. En d'autres mots, la concentration mesurée à l'exutoire d'un lac serait représentative de la charge tombée sur son bassin versant. Outre les apports atmosphériques, les sulfates peuvent provenir de l'altération de la roche en place et des dépôts superficiels, mais cette contribution naturelle reste généralement minime. Néanmoins, de faibles quantités de pyrite et autres sulfures métalliques peuvent parfois générer de fortes teneurs en sulfates. Selon Harvey et al. (1981), les concentrations naturelles maximales en SO_4 provenant du bassin versant ne devraient pas dépasser 30 à 60 µéq/l pour les lacs du bouclier canadien.

La figure IV.3 présente la distribution spatiale des concentrations de sulfates des lacs de la région étudiée. De plus, le tableau ci-dessous donne un aperçu de la distribution des sulfates à l'intérieur de chacun des trois secteurs:



Selon ce tableau, la majorité des lacs du secteur du Pontiac-Témiscamingue présente des teneurs de sulfates supérieures à 140 µéq/l, comparativement à 100-120 µéq/l pour le secteur de Papineau-Labelle et moins de 120 µéq/l pour le secteur du parc du Mont-Tremblant. Cette distribution traduit une baisse des concentrations de sulfates vers l'est. De plus, l'observation des teneurs de SO_4 dans le secteur du Mont-Tremblant semble également confirmer une décroissance vers le nord-est. Une telle décroissance a déjà été observée par Bobée et al. (1982, 1983), Dupont (1984a) et Langlois et al. (1984), dans la région de l'Outaouais. Il apparait improbable que la baisse graduelle des sulfates vers le nord-est soit due à une production naturelle de SO_4. Deux indices semblent appuyer cette hypothèse. Tout d'abord, les teneurs en SO_4 sont plus élevées dans le secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud, comparativement à celles observées dans le secteur du parc du Mont-Tremblant et ce, malgré une géologie comparable. D'autre part, les rapports géologiques (voir section II) ne font mention d'aucun dépôt ou gisement significatif de sulfures métalliques, exception faite de Pollock (1956, 1957) qui fait allusion à des teneurs importantes de pyrite dans les roches de la série de Grenville, lesquelles contiennent du calcaire cristallin. Cette présence de sulfures métalliques dans les roches à forte capacité à neutraliser la charge acide pourrait expliquer la bimodalité des teneurs de sulfates observées au tableau précédent pour le secteur de Papineau-Labelle. Selon un tel scénario, plus de 29 pour cent des lacs de ce secteur seraient caractérisés par une contribution naturelle potentielle en sulfates.

4.4 CONDUCTIVITÉ

La conductivité représente un indice important de vulnérabilité des lacs à l'acidification. En fait, ce paramètre traduit le niveau de minéralisation des eaux lacustres, puisqu'il est dépendant de la concentration ionique totale et de la nature des ions présents. D'autre part, la conductivité est le reflet de la nature géologique des bassins versants étudiés et s'avère dépendante de la dynamique de l'altération chimique de la roche en place et des dépôts superfi-

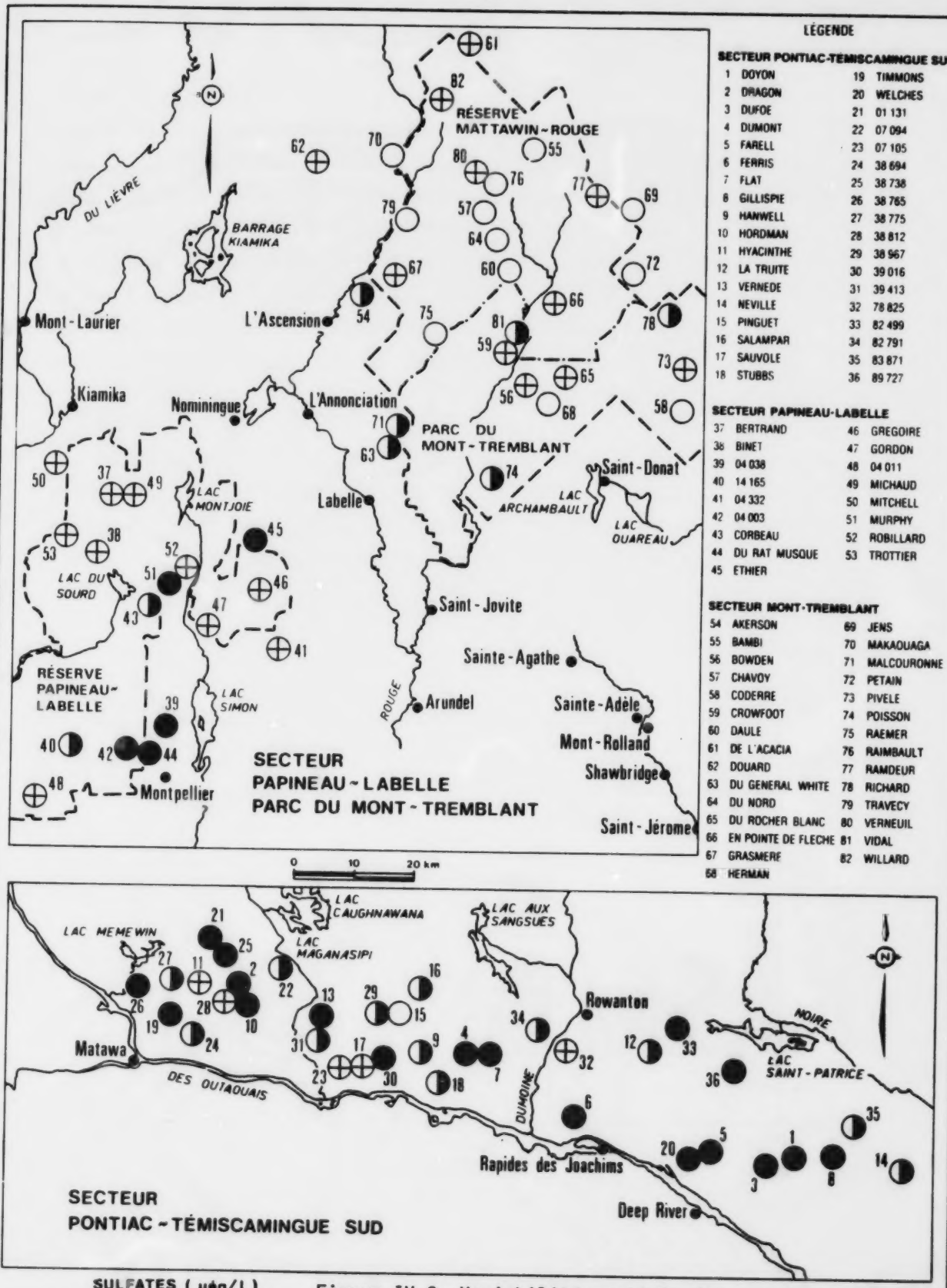
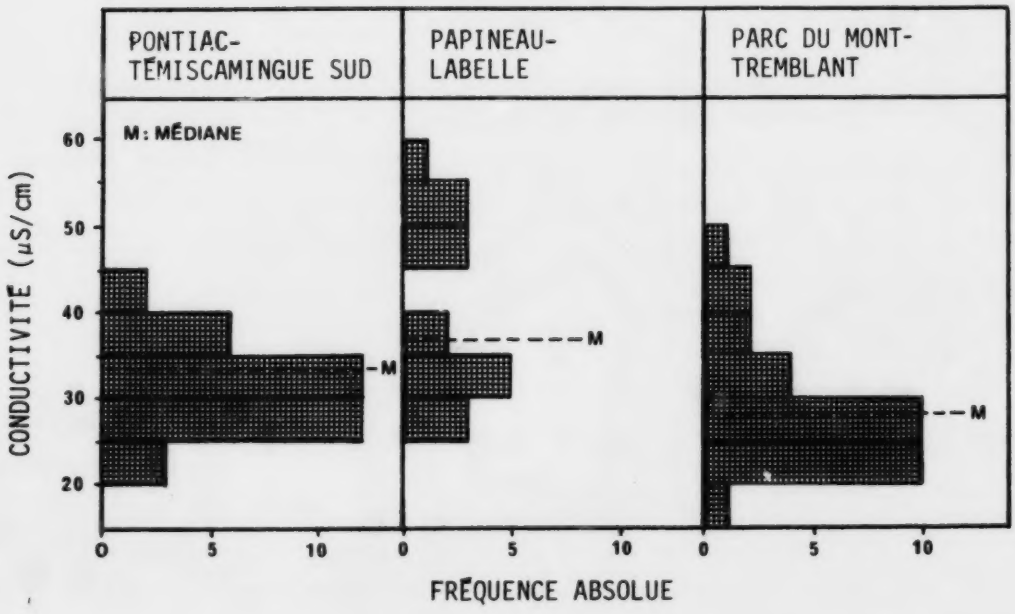
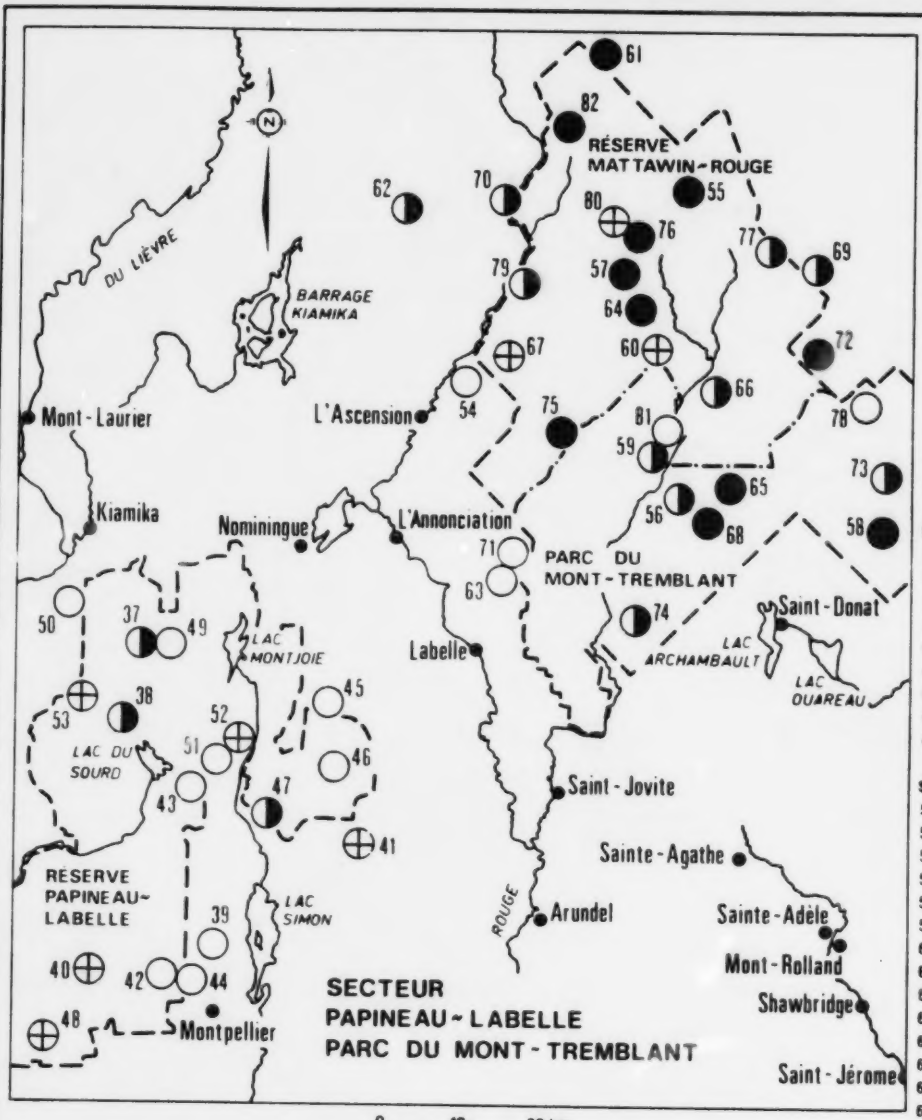


Figure IV.3 Variabilité spatiale des concentrations de sulfates dans la région de l'Outaouais.

ciels. Ainsi, certains types de roches, tels les granites et les quartzites, produisent généralement des eaux peu minéralisées, comparativement à des roches plus altérables ou contenant plus d'éléments carbonatés. Wright et Gjessing (1976) ont estimé le seuil de vulnérabilité extrême, associé à la conductivité, à 20 µS/cm. D'autre part, Thompson et Elder (1979) proposent plutôt 30 µS/cm pour le bouclier canadien. C'est cette dernière valeur que nous utiliserons dans la discussion qui suit puisque tous nos lacs sont situés sur le bouclier canadien.

À la figure IV.4, nous présentons la variabilité spatiale des valeurs de conductivité des lacs échantillonnés dans la région de l'Outaouais, tandis que le tableau ci-dessous donne les fréquences absolues de lacs associés à chacun des intervalles de conductivité.





LÉGENDE

SECTEUR PONTIAC-TÉMISCAMINGUE SUD

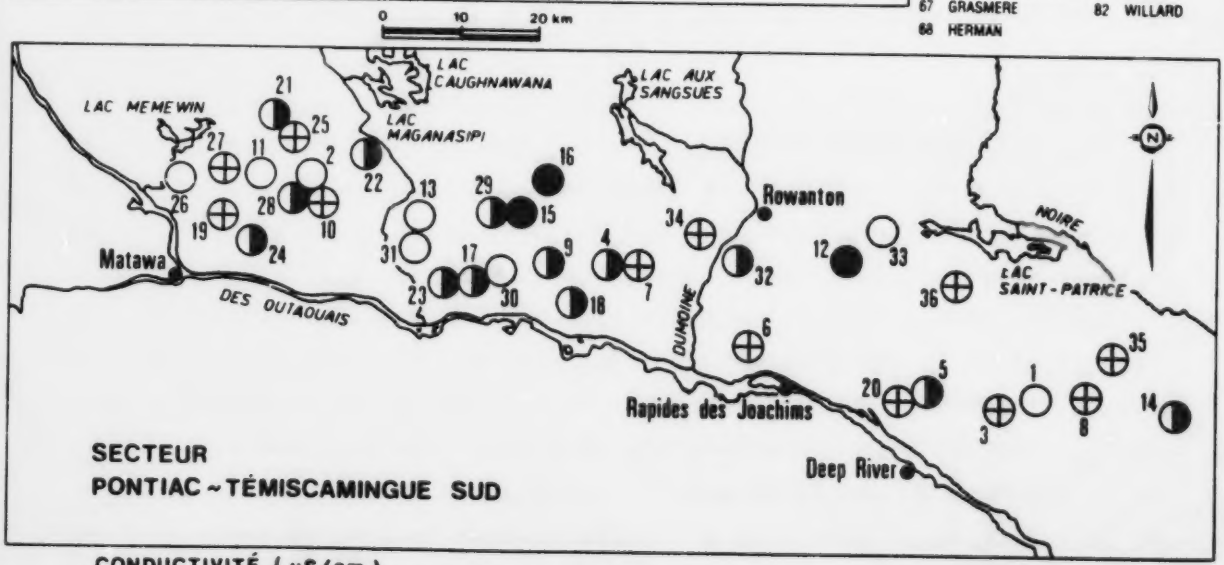
1	DOYON	19	TIMMONS
2	DRAGON	20	WELCHES
3	DUFOE	21	01 131
4	DUMONT	22	07 094
5	FARELL	23	07 105
6	FERRIS	24	38 694
7	FLAT	25	38 738
8	GILLISPIE	26	38 765
9	HANWELL	27	38 775
10	HORDMAN	28	38 812
11	HYACINTHE	29	38 967
12	LA TRUITE	30	39 016
13	VERNEDE	31	39 413
14	NEVILLE	32	78 825
15	PINGUET	33	82 499
16	SALAMPAR	34	82 791
17	SAUVOLE	35	83 871
18	STUBBS	36	89 727

SECTEUR PAPINEAU-LABELLE

37	BERTRAND	46	GREGOIRE
38	BINET	47	GORDON
39	04 038	48	04 011
40	14 165	49	MICHAUD
41	04 332	50	MITCHELL
42	04 003	51	MURPHY
43	CORBEAU	52	ROBILLARD
44	DU RAT MUSQUE	53	TROTTIER
45	ETHIER		

SECTEUR MONT-TREMBLANT

54	AKERSON	69	JENS
55	BAMBI	70	MAKAOUAGA
56	BOWDEN	71	MALCOURONNE
57	CHAVOY	72	PETAIN
58	CODERRE	73	PIVELE
59	CROWFOOT	74	POISSON
60	DAULE	75	RAEMER
61	DE L'ACACIA	76	RAIMBAULT
62	DOUARD	77	RAMDEUR
63	DU GÉNÉRAL WHITE	78	RICHARD
64	DU NORD	79	TRAVECY
65	DU ROCHER BLANC	80	VERNEUIL
66	EN POINTE DE FLÈCHE	81	VIDAL
67	GRASMERE	82	WILLARD
68	HERMAN		



CONDUCTIVITÉ (µS/cm)

● ≤ 25,0 ⊕ 30,0 – 35,0

◑ 25,0 – 30,0 ○ > 35,0

Figure IV.4 Variabilité spatiale de la conductivité dans la région de l'Outaouais.

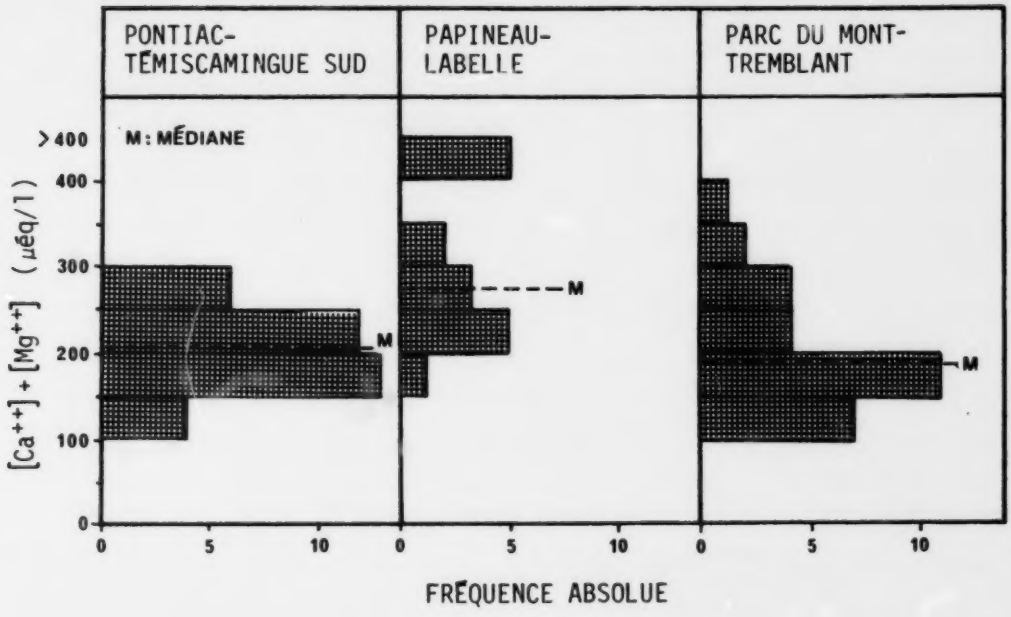
Selon le tableau ci-dessus et la figure IV.4, le secteur du parc du Mont-Tremblant est caractérisé par un fort pourcentage de lacs vulnérables à l'acidification. Ainsi en tenant compte d'un seuil de sensibilité extrême équivalent à 30 µS/cm, plus de 72 pour cent des lacs de ce secteur seraient très sensibles à l'acidification. Ce pourcentage s'avère plus faible pour le secteur du Pontiac-Témiscamingue (44 pour cent), tandis que seul 18 pour cent des lacs du secteur de Papineau-Labelle répondraient à ce critère. Dans le dernier cas, la moins grande vulnérabilité des lacs est liée à la présence d'éléments carbonatés dans le bassin versant.

Fait à noter, les valeurs supérieures de conductivité observées dans les lacs du secteur du Pontiac-Témiscamingue, comparativement au secteur du parc du Mont-Tremblant, pourraient également être dépendantes de facteurs autres que le niveau de minéralisation. En fait, les lacs de ce secteur sont caractérisés par les teneurs de sulfates et d'ions H^+ les plus élevées de la région de l'Outaouais. Ces paramètres et plus particulièrement H^+ peuvent contribuer de façon importante à la conductivité. Si tel était le cas, les lacs du secteur du Pontiac-Témiscamingue pourraient s'avérer plus vulnérables que nous le croyons.

4.5 SOMME DES CONCENTRATIONS DE CALCIUM ET DE MAGNÉSIUM

La somme des concentrations de calcium et de magnésium est parfois utilisée comme un indice de la vulnérabilité des eaux lacustres. Comme dans le cas de la conductivité, ce descripteur est un indicateur du niveau de minéralisation et de la vitesse d'altération chimique de la roche en place et des dépôts non consolidés sur le bassin versant. Les concentrations sont généralement élevées en présence de roches carbonatées , mais peuvent être très faibles lorsque la géologie du bassin versant est associée à des roches peu altérables comme, par exemple, les granites. Les lacs dont la somme des concentrations de calcium et de magnésium est faible sont généralement plus vulnérables à l'acidification. Ainsi, Thompson et Elder (1979) croient qu'un lac est très vulnérable lorsque les concentrations sont inférieures à 200 µéq/l.

À la figure IV.5 nous présentons la variabilité spatiale de la somme des teneurs de calcium + magnésium pour la région de l'Outaouais. D'autre part, le tableau suivant affiche les fréquences absolues de lacs associés aux intervalles de teneurs en calcium + magnésium:



Selon ce tableau et la figure IV.5, la majorité des lacs du secteur de Papineau-Labelle présente des concentrations de calcium + magnésium supérieures à 200 µéq/l. En fait, un seul lac de cette zone affiche une concentration inférieure à ce seuil. Sur la base de cet indice, ce secteur est probablement peu vulnérable à l'acidification. Par ailleurs, plus de 50 pour cent des lacs compris dans les secteurs du Pontiac-Témiscamingue et du parc du Mont-Tremblant présentent des teneurs en calcium + magnésium inférieures au seuil de sensibilité extrême avancé par Thompson et Elder (1979). Ce pourcentage de lacs vulnérables est légèrement plus marqué pour le secteur du parc du Mont-Tremblant. D'autre part, les teneurs en calcium + magnésium supérieures à 350 µéq/l sont probablement liées à

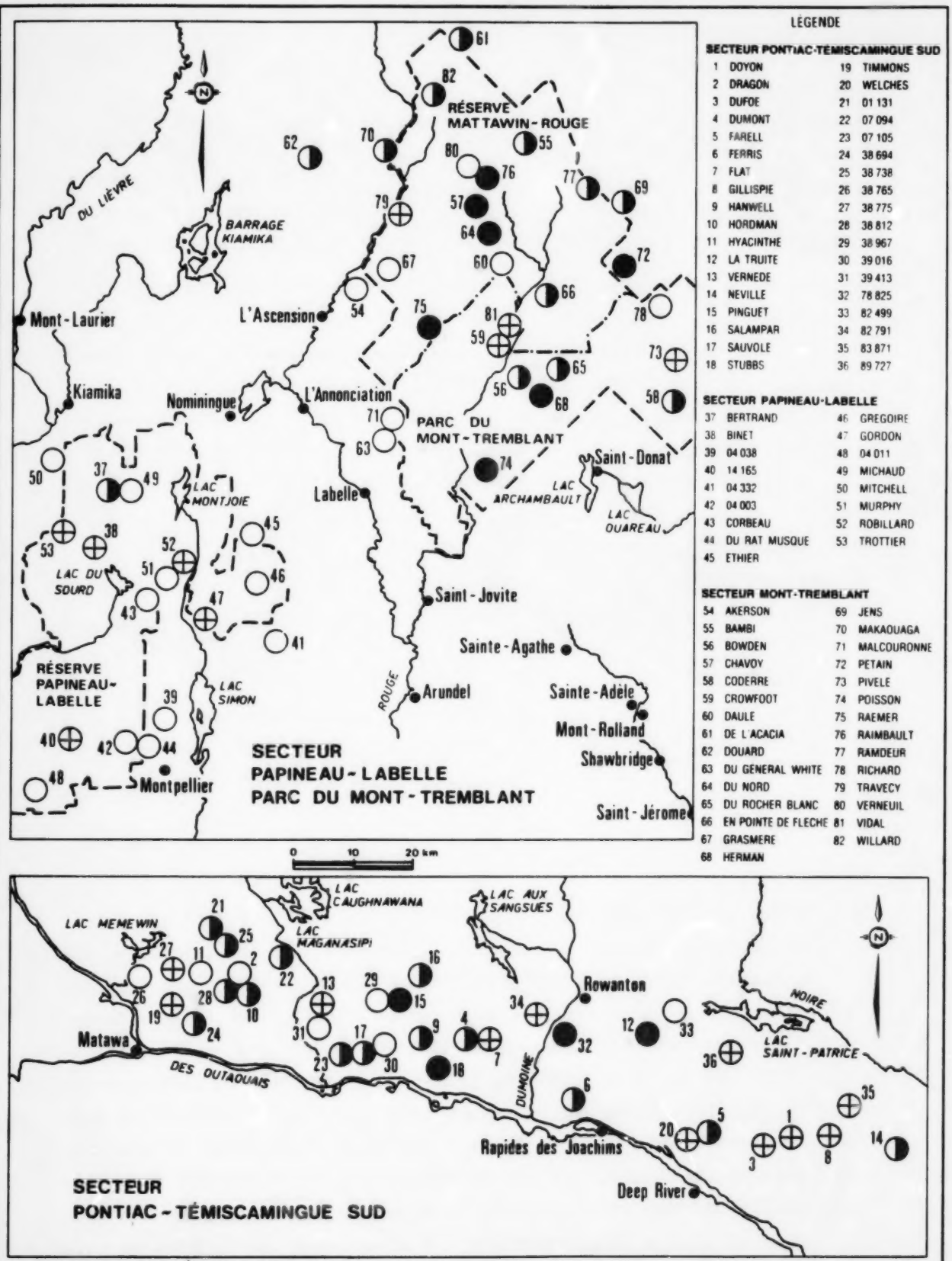


Figure IV.5 Variabilité spatiale de la somme des concentrations de calcium et de magnésium dans la région de l'Outaouais.

la présence d'éléments carbonatés sur le bassin versant des lacs. Ces éléments ont déjà été observés dans plusieurs des bassins versants du secteur de Papineau-Labelle. Il est également possible que des éléments carbonatés soient contenus dans les tills couvrant les bassins versants situés à l'est de Rowanton dans l'est du secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud. En fait, les concentrations de calcium + magnésium observées dans ces lacs sont particulièrement élevées compte tenu du type de géologie caractérisant cette région (roches peu altérables)

4.6 MANGANÈSE ET ALUMINIUM DISSOUS

Les concentrations de manganèse et d'aluminium dissous s'accroissent généralement avec la baisse du pH. Plusieurs auteurs, dont Dickson (1978), Cronan et Schofield (1979), ainsi que Baker et Schofield (1980), croient que la mobilisation de ces métaux lourds, en particulier l'aluminium, serait une conséquence des précipitations acides. Sur le bouclier canadien, les teneurs naturelles de ces métaux traces sont généralement faibles. Scheider et al. (1979) notent que les concentrations naturelles en aluminium, sur le bouclier canadien, devraient varier entre 2 et 10 µg/l, tandis que celles du manganèse seraient de 3 µg/l. Toutefois, malgré la faible solubilité de l'aluminium aux pH supérieurs à 5,5, Driscoll (1980) note que les concentrations de cet élément peuvent être élevées en présence de matière organique.

L'importance de l'aluminium se fait principalement sentir au niveau biologique. Ainsi, Baker (1981) considère l'aluminium comme étant un élément très toxique pour le poisson et en particulier pour les alevins. L'intensité de cette toxicité dépend toutefois de la spéciation de l'aluminium. En effet, Baker (1981) a démontré, pour le poisson, que l'aluminium libre (Al^{+++}) était beaucoup plus toxique que l'aluminium complexé sous diverses formes (hydroxyde, ligand, etc.).

À la figure IV.6, nous présentons la variabilité spatiale des teneurs de manganèse dans les lacs de la région de l'Outaouais. La distribution des concentrations semble très variable. Néanmoins,

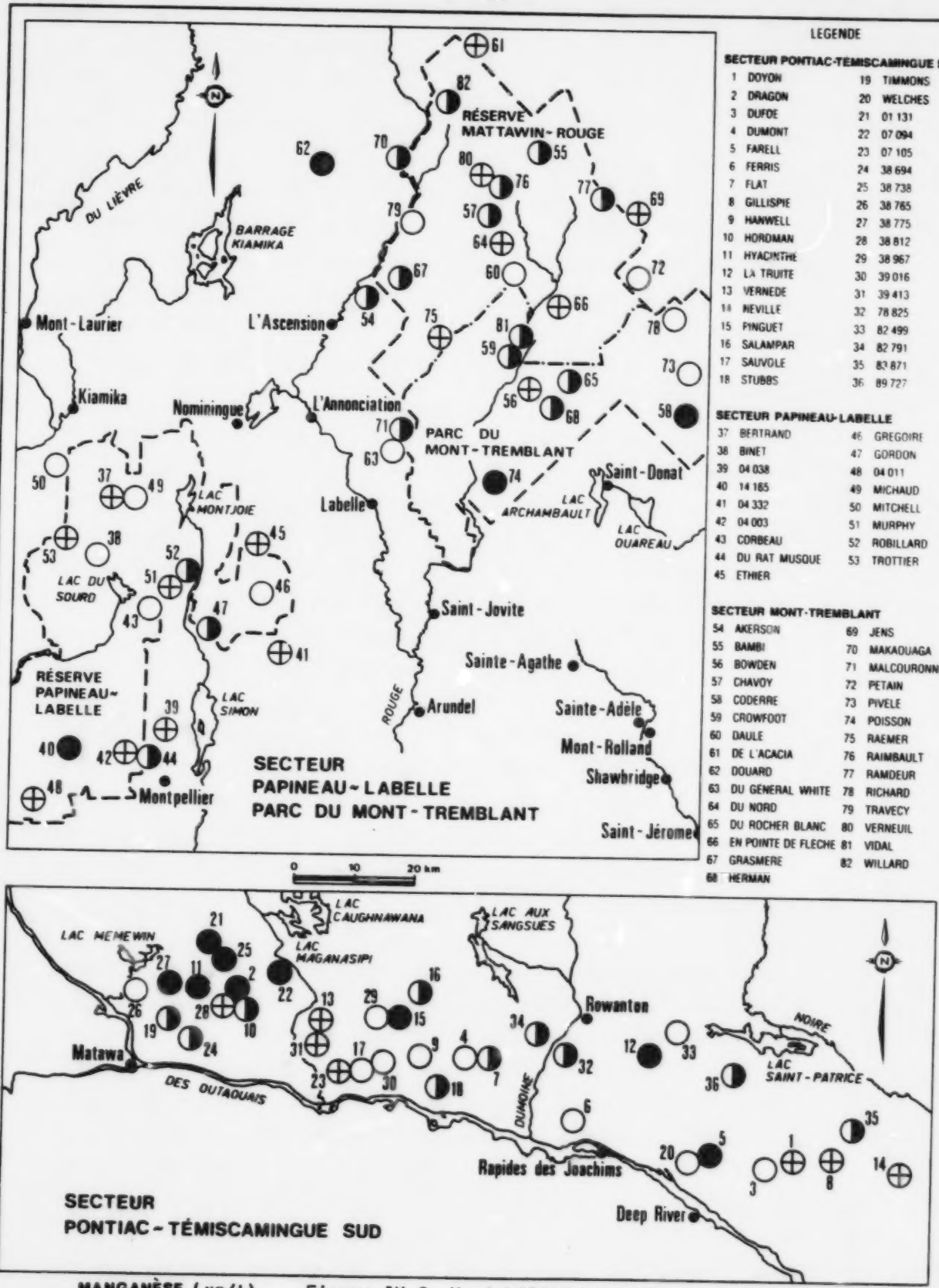


Figure IV.6 Variabilité spatiale des concentrations de manganèse total dans la région de l'Outaouais.

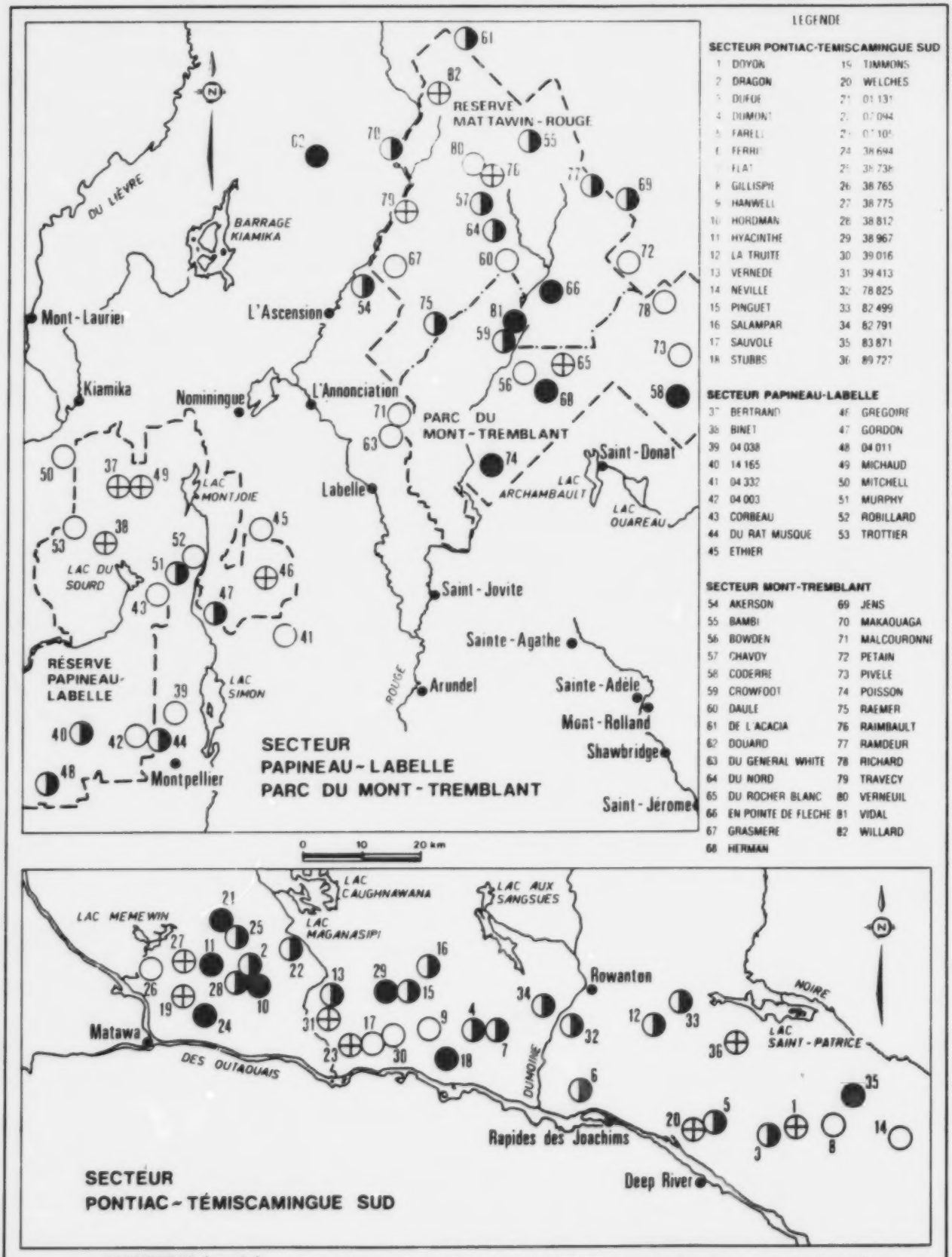
comparées aux autres lacs, les concentrations de manganèse observées dans les lacs du secteur de Papineau-Labelle sont légèrement plus faibles. Par ailleurs, dans le secteur du Pontiac-Témiscamingue, on dénote un grand nombre de lacs à teneur élevée en manganèse au nord-est de Mattawa. Ces concentrations ne semblent pas liées à l'acidité du milieu (Figure IV.1), ni à la présence de matière organique (figure IV.8). Il est possible que la nature géologique de la roche en place puisse être à l'origine de ce comportement.

D'autre part, la figure IV.7 présente la variabilité spatiale de l'aluminium dissous dans la région étudiée. Comparativement aux deux autres secteurs, celui de Papineau-Labelle est caractérisé par un plus grand pourcentage de lacs à faible teneur en aluminium. Ce comportement concorde bien avec la distribution des paramètres discutés dans les sections précédentes. Par ailleurs, 63 pour cent des lacs du secteur du Pontiac- Témiscamingue présentent des teneurs en aluminium supérieures à 50 µg/l, comparativement à 55 pour cent pour le secteur du parc du Mont-Tremblant et 29 pour cent pour le secteur de Papineau-Labelle.

4.7 CARBONE ORGANIQUE TOTAL - COULEUR - TANNINS + LIGNINES

Le carbone organique total (COT), la couleur et les tannins + lignines sont des indices importants de la présence de matière organique dans les eaux lacustres. Toutefois, ces paramètres ne permettent pas d'estimer le niveau d'acidification ou d'acidité des lacs, mais pourraient servir d'indices du type de spéciation de métaux, tels l'aluminium et le manganèse. Par exemple, de fortes valeurs de COT, de couleur ou de tannins pourraient expliquer la présence de teneurs élevées en aluminium sous une forme complexée ou adsorbée à la matière organique, lorsque le pH est supérieur à 5,5.

L'analyse conjointe du COT, de la couleur et des tannins + lignines a été faite en raison de leur similitude de comportement. En fait, Dupont (1984b) et Richard (1985) ont noté de fortes corrélations



LEGENDE

SECTEUR PONTIAC-TEMISCAMINGUE SUD

1	DOYON	19	TIMMONS
2	DRAGON	20	WELCHES
3	DUFOE	21	01 131
4	DUMONT	22	07 044
5	FARELL	23	07 105
6	FERRIE	24	38 694
7	FLAT	25	38 738
8	GILLISPIE	26	38 765
9	HANWELL	27	38 775
10	HORDMAN	28	38 812
11	HYACINTHE	29	38 967
12	LA TRUITE	30	39 016
13	VERNEDE	31	39 413
14	NEVILLE	32	78 825
15	PINGUET	33	82 499
16	SALAMPAR	34	82 791
17	SAUVOLE	35	83 871
18	STUBBS	36	89 727

SECTEUR PAPINEAU-LABELLE

37	BERTRAND	46	GREGOIRE
38	BINET	47	GORDON
39	04 038	48	04 011
40	14 165	49	MICHAUD
41	04 332	50	MITCHELL
42	04 003	51	MURPHY
43	CORBEAU	52	ROBILLARD
44	DU RAT MUSQUE	53	TROTTIER
45	ETHIER		

SECTEUR MONT-TREMBLANT

54	AKERSON	69	JENS
55	BAMBI	70	MAKAOUAGA
56	BOWDEN	71	MALCOURONNE
57	CHAVOY	72	PETAIN
58	CODERRE	73	PIVELE
59	CROWFOOT	74	POISSON
60	DAULE	75	RAEMER
61	DE L'ACACIA	76	RAIMBAULT
62	DOUARD	77	RAMDEUR
63	DU GENERAL WHITE	78	RICHARD
64	DU NORD	79	TRAVECY
65	DU ROCHER BLANC	80	VERNEUIL
66	EN POINTE DE FLECHE	81	VIDAL
67	GRASMERE	82	WILLARD
68	HERMAN		

ALUMINIUM (µg/l)

- ● ≥ 90
- ◑ 50-90
- ⊕ 20-50
- ○ < 20

Figure IV.7 Variabilité spatiale des concentrations en aluminium dissous dans la région de l'Outaouais.

entre ces paramètres. De plus, Reuter et Perdue (1977) ont mis en évidence la similitude de la nature chimique du carbone organique et des tannins. Par ailleurs, Christman et Minear (1971) ont attribué une origine pédologique commune aux substances humiques (incluant les tannins et l'acide tannique) et aux molécules colorées.

Aux figures IV.8, IV.9 et IV.10, nous présentons respectivement la variabilité spatiale du carbone organique total, des tannins + lignines et de la couleur sur la région étudiée. On note une grande similitude au niveau de la variabilité spatiale des trois paramètres considérés. Ce comportement tend à confirmer les résultats obtenus par Dupont (1984b) et Richard (1985). D'autre part, la distribution spatiale des valeurs de COT, de couleur et de tannins semble très variable à l'intérieur des trois secteurs considérés. Ceci suggère, que le comportement de ces paramètres serait indépendant de l'ampleur des charges acides reçues par un lac (les distributions spatiales du COT, de la couleur et des tannins sont très différentes de celles des sulfates). Toutefois, plusieurs lacs acides, présentant des concentrations de sulfates supérieures à 100 µéq/l (lacs 12, 16, 68 et 74), sont caractérisés par des valeurs de couleur inférieures à dix unités hazen. Dans ces lacs, où l'aluminium atteint parfois des valeurs de 250 µg/l, le facteur de complexation avec les ligands organiques pourrait s'avérer minime. Il faut mentionner aussi que des valeurs de couleur inférieures à dix unités hazen sont également observées dans plusieurs lacs alcalins (lacs 39, 41, 42, 43, 45, 50). La présence de matière organique dans un lac ne semble donc pas liée au niveau de minéralisation.

4.8 SYNTHÈSE DES OBSERVATIONS

Afin de résumer les observations contenues dans cette section, nous avons retenu les principaux points d'intérêt relatifs à la variabilité spatiale des paramètres physico-chimiques.

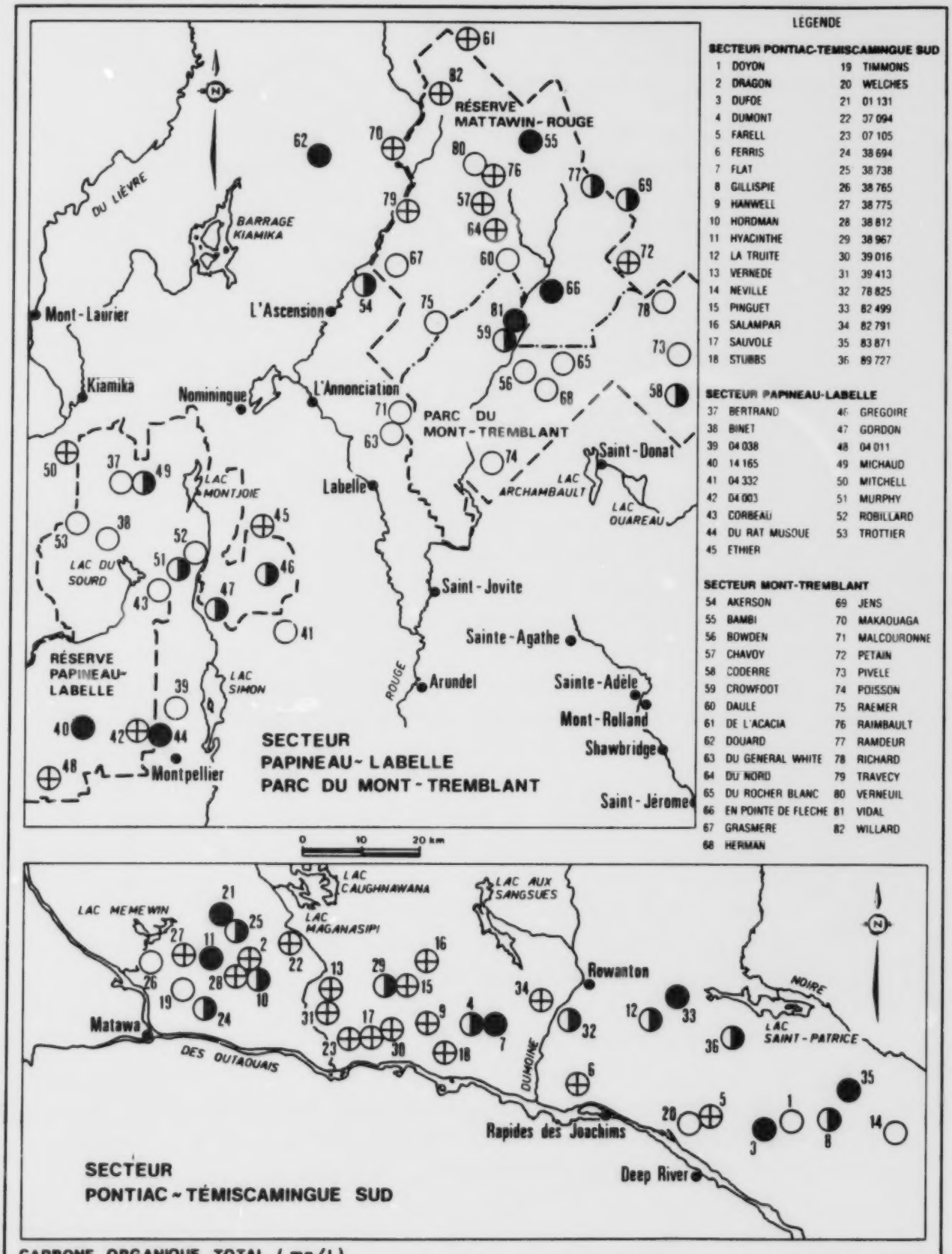


Figure IV.8 Variabilité spatiale des concentrations de carbone organique total dans la région de l'Outaouais

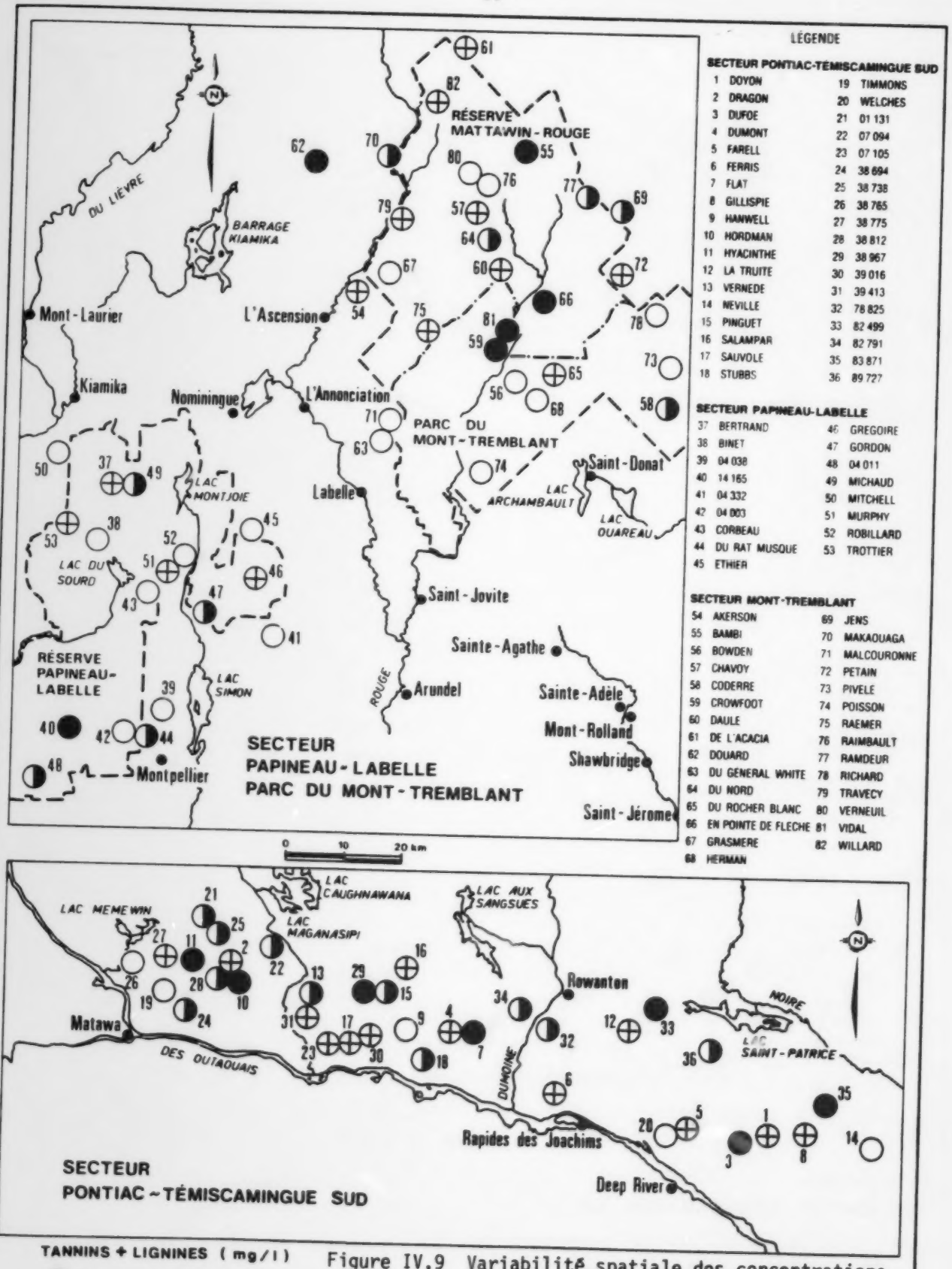


Figure IV.9 Variabilité spatiale des concentrations de tannins + lignines dans la région de l'Outaouais.

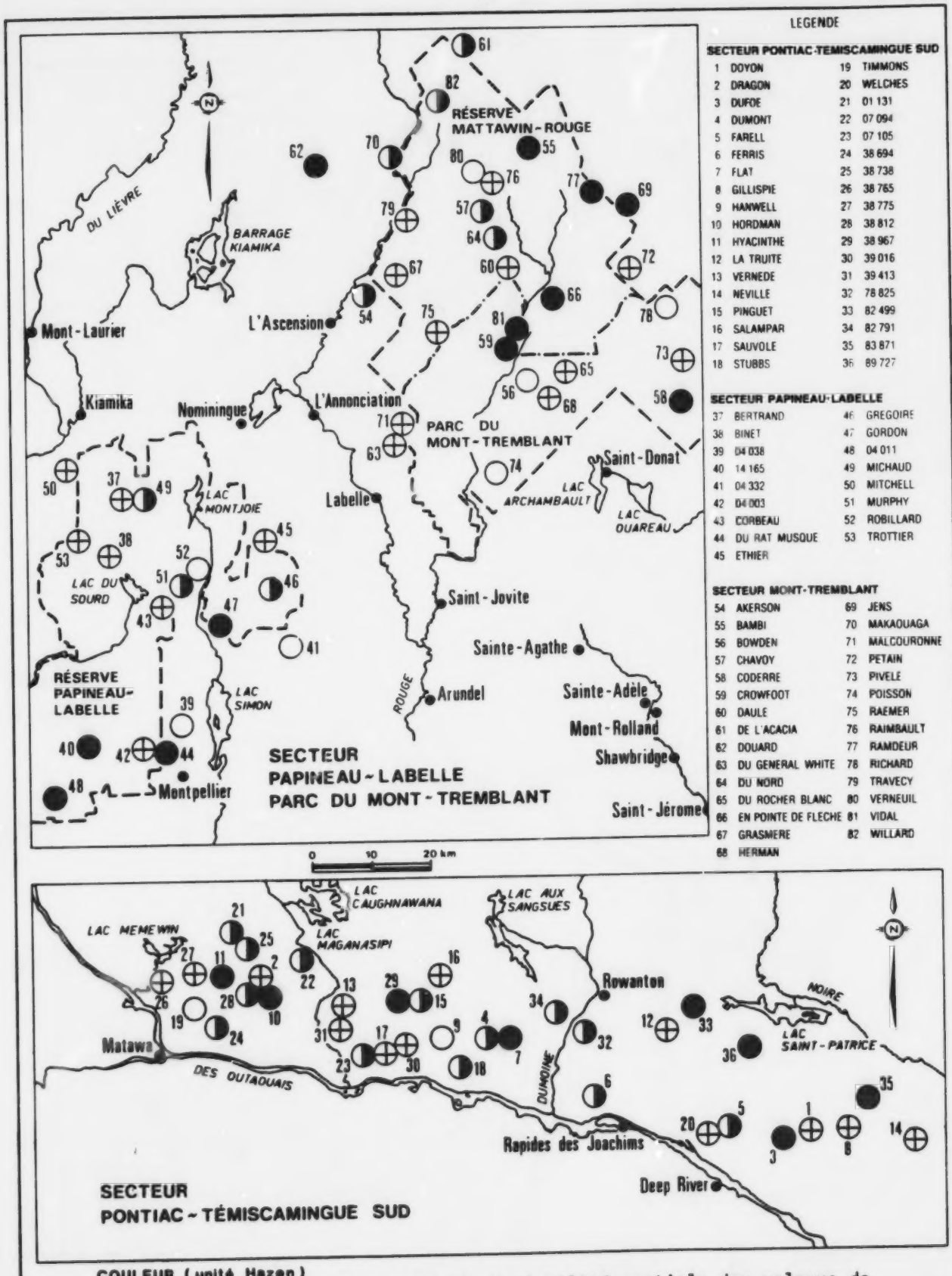


Figure IV.10 Variabilité spatiale des valeurs de couleur dans la région de l'Outaouais.

- la plupart des lacs du secteur du Pontiac-Témiscamingue sud présentent de fortes teneurs en sulfates (>140 µéq/l). En fait, ces concentrations sont généralement plus élevées que celles observées dans les deux autres secteurs étudiés;

- l'apport atmosphérique serait le principal responsable des teneurs de sulfates observées dans les lacs de la région de l'Outaouais. Toutefois, les teneurs élevées en sulfates observées dans plusieurs lacs alcalins du secteur de Papineau-Labelle, dont la géologie du bassin versant est associée aux roches de la série de Grenville, pourraient provenir en partie de l'oxydation des sulfures métalliques (pyrite) contenus dans la roche;

- une grande partie des lacs des secteurs du Pontiac-Témiscamingue et du parc du Mont-Tremblant sont très vulnérables à l'acidification, contrairement aux lacs du secteur de Papineau-Labelle qui sont plus alcalins;

- selon le niveau de minéralisation et de la capacité de la roche en place à neutraliser la charge acide, on peut classer les secteurs étudiés selon un ordre décroissant de sensibilité: parc du Mont-Tremblant > Pontiac-Témiscamingue Sud > Papineau-Labelle.

- un classement similaire peut être fait selon le degré d'agression par les sulfates et le niveau d'acidité des lacs; Pontiac-Témiscamingue Sud > parc du Mont-Tremblant ≥ Papineau-Labelle;

- les concentrations de carbone organique et de tannins + lignines, ainsi que les valeurs de couleur sont très variables dans la région de l'Outaouais. Toutefois, la variabilité spatiale de ces paramètres demeure relativement constante d'un secteur à l'autre.

CHAPITRE V

TRAITEMENT STATISTIQUE

Pour faire suite à la description de la variabilité spatiale des paramètres physico-chimiques, nous avons considéré l'approche statistique afin de quantifier les relations entre paramètres et de dégager les comportements spécifiques des variables. Ainsi, parmi les méthodes statistiques existantes, nous avons appliqué l'analyse de corrélation pour estimer les relations entre paramètres, l'analyse multivariée pour faire une description globale de la variabilité physico-chimique et finalement, l'analyse discriminante pour déterminer l'influence de la géologie sur la physico-chimie des lacs de la région de l'Outaouais.

5.1 ANALYSE DE CORRÉLATION

L'analyse de corrélation de Spearman a été choisie pour l'étude des relations entre paramètres physico-chimiques. Les raisons de ce choix apparaissent dans Dupont (1984b). Le rho (ρ) de Spearman est un test non paramétrique basé sur des rangs de classement en ordre croissant, ne requérant aucun paramètre de population (moyenne, écart-type). Bien que le test soit non paramétrique, il demeure applicable aux descripteurs métriques, en autant que ces derniers soient ordonnés (Legendre et Legendre, 1979). Les coefficients de Spearman peuvent varier entre -1 et 1, les bornes traduisant une corrélation maximale, tandis que "0" indique l'absence de corrélation.

Pour l'analyse de corrélation, 18 descripteurs ont été retenus: les sulfates, le pH, la conductivité, l'alcalinité, le calcium, le magnésium, la somme des cations, le rapport bicarbonate/sulfate, l'excès de cations (Ca + Mg - Alcalinité), l'altitude, la turbidité, les tannins + lignines, la couleur, le carbone organique total (COT), les acides faibles, l'aluminium dissous, le fer et le

manganèse. Chacune de ces variables présentait au moins une corrélation significative avec les autres au niveau de confiance α= 0,01.

Le tableau V.1 présente la liste des corrélations significatives au niveau de confiance α = 0,01. Toutefois, afin de simplifier l'analyse de ce tableau, nous avons transposé chacune des corrélations dont le coefficient était supérieur à 0,5, sur un graphe circulaire (figure V.1). En outre, nous avons regroupé les variables concomitantes ou traduisant un comportement physico-chimique similaire et ce, pour deux raisons. Tout d'abord, le coefficient de corrélation entre ces variables est généralement élevé. D'autre part, le regroupement des variables redondantes permet de clarifier la représentation graphique. Ainsi, quatre principaux regroupements ont été constitués (figure V.1). Le premier groupe de variables qui inclut la somme des cations, le calcium, le magnésium, l'alcalinité et la conductivité, est relié au niveau de minéralisation ou de vulnérabilité des lacs. Le deuxième groupe, regroupant la couleur, la turbidité, les tannins, le COT et les acides faibles, est associé à la présence de matière organique. Le troisième groupe est constitué du pH, des sulfates et du rapport $[HCO_3]/[SO_4]$. Ces paramètres peuvent servir d'indices du niveau d'acidification. Finalement, le manganèse, l'aluminium et le fer constituent le quatrième groupe. Il est à noter que les relations les plus intéressantes ($r \geqslant 0,6$) sont présentées sous une forme graphique aux annexes 4.1 à 4.30.

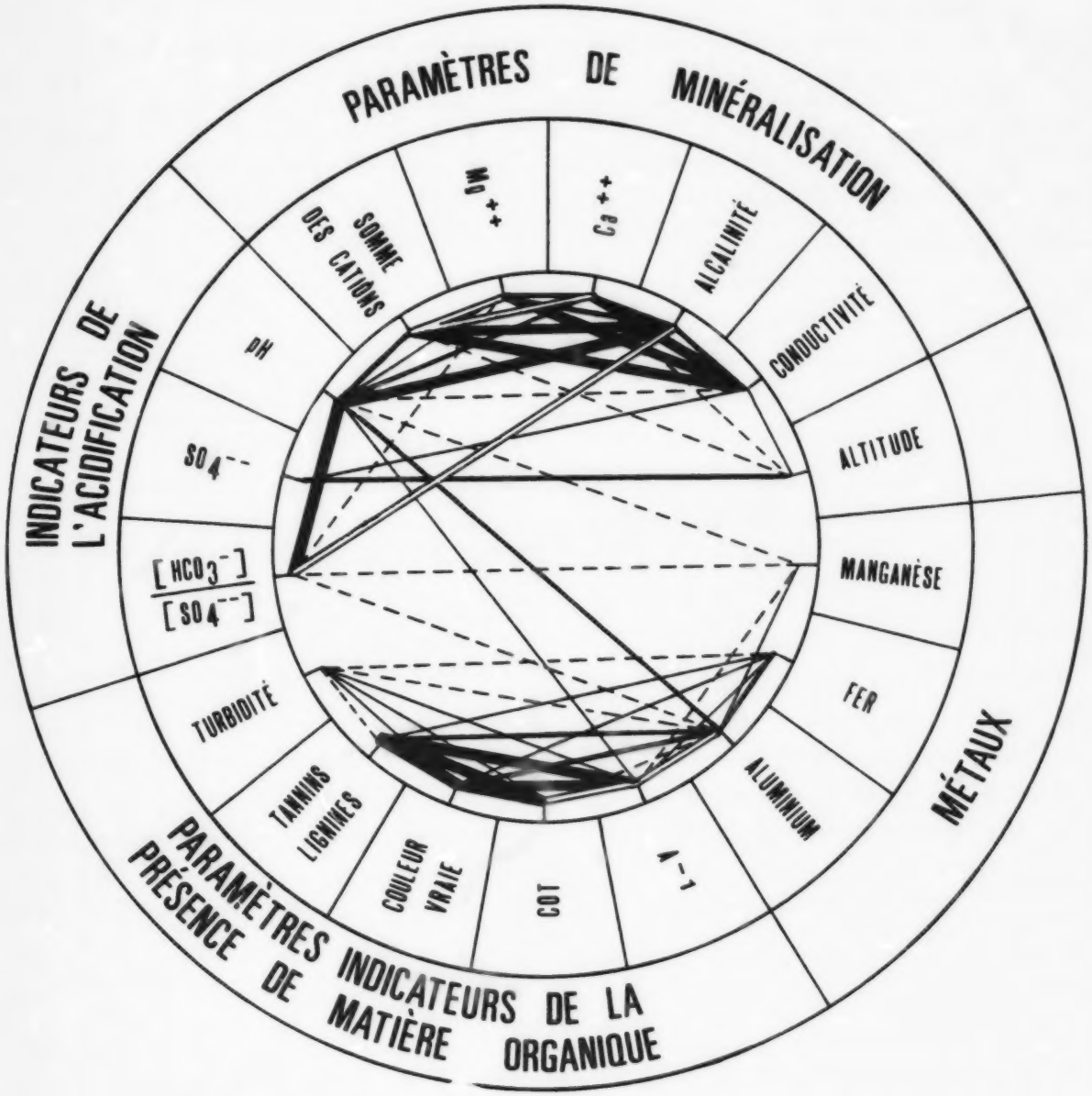
Le comportement du pH est particulièrement important pour une étude portant sur la détermination de l'étendue de l'acidification. Selon la figure V.1 et le tableau V.1, le pH est fortement corrélé positivement à l'alcalinité (r = 0,88). Ainsi, le pH tend à être élevé lorsque l'alcalinité est élevée. Ce comportement est également observé de façon moins nette chez les autres paramètres de minéralisation (pH vs Ca: r = 0,74; pH vs cations: r= 0,72; pH vs Mg: r = 0,60; pH vs conductivité: r = 0,60). Un tel comportement suggère une acidité accrue des eaux lacustres lorsque le niveau de minéralisation est faible.

TABLEAU V.1: Détails des liens de corrélation de Spearman, significatifs au niveau α =,01, pour 81 lacs de la région de l'Outaouais.

	pH	Sulfates (SO_4^{--})	Manganèse (Mn)	Fer (Fe)	Aluminium dissous	Acides faibles	COT	Couleur	Tannins + Lignines	Turbidité	Altitude	(Ca) + (Mg) - Alcalinité	$[HCO_3^-]/[SO_4^{--}]$	Somme des cations	Magnésium (Mg)	Calcium (Ca)	Alcalinité	Conductivité
pH																		
Sulfates (SO_4^{--})																		
Manganèse (Mn)	-,59																	
Fer (Fe)																		
Aluminium dissous (Al)	-,77		,62	,73														
Acides faibles	-,62		,52	,64	,85*													
COT				,47	,59	,86*												
Couleur	-,49			,70	,72	,81	,85											
Tannins + Lignines	-,58			,68	,76	,88	,86	,96										
Turbidité	-,42			,55	,54	,62	,64	,61	,58									
Altitude		-,71																
[Ca] + [Mg] - Alcalinité		,74									-,59							
$[HCO_3^-]/[SO_4^{--}]$	,85		-,53		-,55													
Somme des cations	,72	,48									-,55	,46*	,72					
Magnésium (mg)	,60	,48									-,46	,46*	,56	,84*				
Calcium (Ca)	,74	,41	-,40								-,53	,40*	,74	,96*	,75			
Alcalinité	,88		-,50		-,57								,95*	,89	,74	,89		
Conductivité	,60	,63									-,63	,49	,58	,95	,82	,89	,80	

* Corrélations biaisées: un des paramètres de la relation a été estimé à partir de l'autre.

ANALYSE DE CORRÉLATION
(rho de Spearman)



CORRÉLATIONS SIGNIFICATIVES AU SEUIL α : 0,01

2 — |r| > 0,80
0,70 < |r| ≤ 0,80
0,60 < |r| ≤ 0,70
0,50 < |r| ≤ 0,60

1 : ANIONS PROVENANT DE LA DISSOCIATION DES ACIDES FAIBLES TEL QU'ESTIMÉ PAR L'ÉQUATION DE WEBB (1982)

2 : CORRÉLATIONS BIAISÉES, LA CONDITION D'INDÉPENDANCE ENTRE LES VARIABLES NE TIENT PAS.

Figure V.1 Histogramme des liens de corrélation de Spearman calculés à partir des données physico-chimiques des lacs de la région de l'Outaouais.

L'influence des précipitations acides pourrait s'avérer une cause potentielle de la plus grande acidité des eaux peu minéralisées. Toutefois, aucune relation significative, au niveau de confiance $\alpha = 0,01$, n'est observée entre le pH et les sulfates, pour les lacs de la région de l'Outaouais. L'analyse de la relation entre le pH et les sulfates, pour des niveaux fixes de calcium, ne permet pas d'obtenir de meilleures corrélations. Néanmoins, cette situation était prévisible puisque la baisse de pH entraînée par des apports acides accrus peut demeurer minime, tant que l'alcalinité associée aux bicarbonates n'est pas épuisée. Sur les 81 échantillons recueillis, seuls deux lacs présentent une alcalinité nulle ou négative.

D'autre part, le pH est fortement lié au rapport bicarbonate/sulfate ($r = 0,85$). Ainsi, le pH est généralement faible lorsque le rapport $[HCO_3]/[SO_4]$ est petit. Ceci est particulièrement vrai pour des rapports inférieurs à l'unité (voir annexe 4.5). Selon un tel comportement, le pH est d'autant plus faible que la concentration relative de sulfates surpasse celle des bicarbonates. Cette relation pourrait être un indice de l'influence des teneurs élevées en sulfates sur l'acidité des eaux lacustres.

Outre les relations précédentes, on note une relation inversement proportionnelle entre le pH et l'aluminium dissous ($r = -0,77$). Ainsi, les concentrations en aluminium dissous sont généralement élevées lorsque le pH est bas. Toutefois, cette relation ne permet pas de déterminer l'origine de l'acidité des eaux lacustres.

Le pH est également lié aux acides faibles ($r = 0,62$) dans le sens où le pH tend à être bas lorsque les concentrations d'acides faibles sont élevées. Toutefois, cette relation n'impliquerait pas une contribution naturelle importante des acides organiques à l'acidité des lacs puisqu'aucune relation significative n'a été observée entre le pH et les autres indicateurs de la présence de matière organique tels, les tannins + lignines, la couleur et le carbone organique total.

La figure V.1 met également en évidence de fortes corrélations entre les divers paramètres de minéralisation (conductivité vs Σcations: r = 0,95; conductivité vs Ca: r = 0,89; conductivité vs Mg: r = 0,82; conductivité vs alcalinité: r = 0,80; alcalinité vs Ca: r = 0,89; alcalinité vs Σcations: r = 0,89; alcalinité vs Mg: r = 0,74; Ca vs Mg: r = 0,75). Ainsi, lorsque le niveau de minéralisation est élevé, tous les paramètres précédents devraient présenter des valeurs élevées.

Un scénario similaire est observé dans le cas des paramètres liés à la présence de matière organique (tannins vs couleur: r = 0,96; tannins vs COT: r = 0,86; tannins vs acides faibles: r = 0,88; couleur vs COT: r = 0,85; couleur vs acides faibles: r = 0,81). En fait, ces paramètres, dont font partie les tannins + lignines, le COT et la couleur, sont intimement liés sur le plan de leur nature chimique, ce qui explique les fortes corrélations obtenues.

Du côté des sulfates, trois relations ont été mises en évidence par l'analyse de corrélation. Tout d'abord, les sulfates sont corrélés positivement à l'excès de cations (r = 0,74). Bobée et al. (1982) ont trouvé une relation similaire pour l'ensemble des régions hydrographiques 04 à 08 (r = 0,71). Ces auteurs suggèrent que l'excès de calcium et de magnésium traduirait l'altération chimique des minéraux du bassin par des acides forts, tel l'acide sulfurique provenant des apports atmosphériques.

Une seconde relation semble mettre en évidence la dépendance des sulfates avec l'altitude (r = -0,71). Selon celle-ci, les concentrations de sulfates diminueraient avec l'altitude (annexe 4.16). Ce comportement peut s'expliquer de trois façons. Premièrement, il peut y avoir une baisse réelle des concentrations de SO_4 dans les précipitations avec l'altitude, laquelle pourrait être attribuée à divers facteurs météorologiques, dont l'influence du relief sur la dynamique de la circulation des masses d'air, la variabilité du volume de précipitation avec l'altitude, le déficit d'écoulement, etc. Une deuxième cause s'expliquerait par la

distance des lacs aux sources d'émission de SO_2. En fait, l'altitude augmente graduellement avec la distance à la rivière des Outaouais. Ainsi, les lacs les plus élevés en altitude sont également les plus distants de l'Ontario et des États-Unis. C'est dans ces lacs que l'on observe les plus faibles teneurs en sulfates. Une dernière cause potentielle pourrait s'expliquer par une variabilité spatiale de la contribution naturelle en sulfates provenant de la géologie. Toutefois, cette hypothèse semble invraisemblable à cause des raisons invoquées au chapitre 4 et parce que le type de géologie ne varie guère avec l'altitude. Néanmoins, cet aspect nous mène directement à la description de la dernière relation.

La troisième et dernière relation, considérant les sulfates, met en évidence une dépendance mineure entre les teneurs en SO_4 et la conductivité ($r = 0,63$). Une telle relation impliquerait une augmentation des concentrations de sulfates avec l'accroissement du niveau de minéralisation. Par exemple, l'observation de la figure présentée à l'annexe 4.17 montre que les lacs caractérisés par une conductivité supérieure à 40 µS/cm affichent, pour la plupart, des teneurs élevées en SO_4. La majorité de ces lacs est associée à la présence de roches carbonatées sur leur bassin versant, lesquelles peuvent renfermer des sulfures métalliques. En excluant ces lacs, la relation sulfates-conductivité ne tient plus.

La turbidité présente des relations mineures avec les acides faibles ($r = 0,62$) et le COT ($r = 0,64$). Toutefois, l'examen des figures présentées aux annexes 4.23 et 4.24 montre que l'importance du coefficient de corrélation est principalement due au poids de quelques valeurs extrêmes de turbidité. Ainsi, en excluant les trois lacs dont les valeurs de turbidité et d'acides faibles sont supérieures à 0,6 U.T.N. et à 70 µéq/l respectivement, la relation turbidité - acides faibles ne tient plus. La relation turbidité - COT est plus forte et laisse croire que la turbidité et le COT sont faiblement liés.

Les métaux lourds (Fe, Al) sont liés d'une certaine façon à la présence de matière organique puisqu'ils sont correlés positivement aux tannins et à la couleur (Al vs tannins: r = 0,76; Al vs couleur: r = 0,72; Fe vs tannins: r = 0,68; Fe vs couleur: r = 0,70). Ce type de relation implique qu'une partie des métaux lourds pourrait être complexée ou adsorbée à la matière organique[1].

Finalement, on note des relations mineures entre divers métaux lourds (Fe vs Al: r = 0,73; Mn vs Al: r = 0,62). Ces relations suggèrent que le comportement des métaux lourds serait similaire dans l'environnement. Ainsi, lorsqu'un élément trace, tel l'aluminium, présente de fortes teneurs, les autres métaux lourds affichent généralement des concentrations élevées.

5.2 ANALYSE MULTIVARIÉE

L'analyse multivariée permet de dégager les comportements relatifs entre plusieurs paramètres physico-chimiques. De plus, elle permet de grouper les lacs ayant des caractéristiques physico-chimiques similaires et de définir les traits dominants de chacune des classes obtenues.

Nous avons considéré deux méthodes d'analyse multivariée dans le cadre de cette étude: l'analyse factorielle des correspondances (AFC) et la classification ascendante hiérarchique (CAH). Les raisons de ce choix ainsi qu'une description plus détaillée de ces méthodes sont présentées dans le rapport de Dupont (1984a). En quelques mots, l'AFC décrite par Lebart et Fénélon (1973) permet une représentation conjointe des points-paramètres et des points-observations dans un même espace factoriel où la distance relative séparant chacun de ces points constitue le facteur clé de l'analyse.

---

1 Communication personnelle de P.G.C. Campbell

D'autre part, la CAH décrite par Jambu (1973) permet de classer les points-observations (lacs) d'une façon objective et automatique à partir d'une distance particulière entre chacun des points (distance euclidienne, distance du chi-carré, etc.). Dans le cas présent, la CAH est appliquée sur les résultats générés par l'AFC (en l'occurrence, les fréquences reconstituées et les coordonnées des lacs et des points-paramètres dans l'espace factoriel). L'utilisation combinée de ces deux méthodes a été discutée par Bobée et al. (1977a, 1981, 1982 et 1983), tandis qu'une description détaillée de chacune des approches a été donnée par Bobée et al. (1977b).

Dans la présente étude, deux analyses multivariées distinctes furent réalisées à partir des données physico-chimiques recueillies dans la région de l'Outaouais. La première analyse considère uniquement les données physico-chimiques des lacs recueillies dans la région de l'Outaouais. Elle a pour but de grouper les lacs selon leurs caractéristiques propres. La deuxième analyse vise à comparer la physico-chimie des lacs de la région de l'Outaouais avec la classification de lacs obtenue pour la région de Rouyn-Noranda (Dupont, 1984a).

5.2.1 CLASSIFICATION DES LACS DE LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS

Lors de l'analyse multivariée, six variables, dites actives, ont été considérées: le pH, l'alcalinité, les sulfates, la conductivité, l'aluminium dissous et la couleur. En fait, seules les variables actives sont utilisées lors du calcul des statistiques multivariées, contrairement aux variables supplémentaires qui ne possèdent aucun poids. Le pH, l'alcalinité, les sulfates et l'aluminium ont été choisis en vertu de leur importance au niveau des processus d'acidification. Par ailleurs, la conductivité et l'alcalinité ont une importance particulière pour la détermination de la sensibilité naturelle des lacs et du niveau de minéralisation, tandis que la couleur constitue un indice de la présence de matière organique.

Nous aurions également pu utiliser la concentration en ions H^+ au lieu du pH, mais un tel choix n'aurait rien changé à la classification finale. D'autre part, nous avons préféré la couleur aux tannins + lignines, en raison de la faible étendue de la gamme des concentrations de ce dernier paramètre. De plus, l'intensité des liens de corrélation entre la couleur et les variables, tels le COT et les tannins ($r = 0,85$ et $r = 0,96$) permet l'utilisation de ce paramètre en tant qu'indice de la présence de matière organique.

Dix variables supplémentaires ont été ajoutées à l'analyse dans le but de comparer leur comportement avec celui des variables actives: les tannins + lignines, le COT, le rapport bicarbonate/sulfate, la capacité de la roche en place à neutraliser la charge acide, le secteur étudié, l'altitude, l'excès de cations, l'indice de saturation calcique, la somme des cations et la superficie du lac. Les tannins + lignines et le COT ont été considérés relativement à la présence de matière organique. Le rapport $[HCO_3]/[SO_4]$, l'excès de cations et l'indice de saturation calcique peuvent s'avérer intéressants au niveau du processus d'acidification. La somme des cations et la capacité de la roche en place à neutraliser la charge acide peuvent s'avérer utiles au niveau de la minéralisation. Enfin, quelques variables physiques (altitude, secteur étudié et superficie du lac) pourraient nous fournir certaines informations sur l'influence du milieu physique.

Les données relatives à chacun des paramètres ont été divisées en trois classes quasi-équiprobables, tout en tenant compte des discontinuités. Par la suite, chacune de ces données classées a été transformée du format original au format binaire selon la méthode décrite dans Bobée et al. (1982). Selon ces auteurs, une telle classification n'impliquerait pas une perte significative d'informations. D'autre part, la codification permettrait d'éliminer le poids associé aux

valeurs extrêmes et de minimiser l'imprécision des mesures et l'incertitude associées aux valeurs se trouvant sous le seuil de détection.

Le tableau V.2 présente les valeurs de seuil des classes attribuées à chacun des paramètres considérés. Dans ce tableau, le passage de la classe 1 à la classe 3 implique un accroissement des concentrations ou des valeurs. Le tableau de contingence final contient 48 colonnes (16 paramètres x trois classes) et 81 lignes (lacs).

Positionnement des paramètres dans le continuum factoriel

L'application d'une AFC sur 18 descripteurs (six variables actives x trois classes) permet de réaliser une représentation statistique selon 18 axes factoriels (dimensions). Toutefois, les 18 axes factoriels ne sont pas tous significatifs et les variances relatives des axes à l'explication des paramètres et des lacs ne sont pas égales pour tous. Dans le cas présent, sept axes factoriels ont été retenus pour l'analyse. Ce nombre d'axes significatifs a été déterminé par le modèle du bâton brisé de Frontier (1976). Selon ce modèle, le nombre d'axes interprétables est obtenu par la comparaison des pourcentages de variance associés aux valeurs propres successives des distributions aléatoire et observée. Ainsi, pour qu'un axe factoriel soit significatif, la variance observée doit être supérieure à la variance aléatoire.

Un examen sommaire des contributions relatives des facteurs aux paramètres étudiés peut nous fournir certains indices sur le comportement spécifique de ces variables dans le milieu naturel. Ainsi, le pH, l'alcalinité, la conductivité et l'aluminium présentent des contributions relatives cumulées

TABLEAU V.2: Valeurs des seuils utilisés, pour chaque variable, pour la codification des données de 81 lacs des secteurs du Pontiac-Témiscamingue Sud, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant.

	VARIABLES ACTIVES						VARIABLES SUPPLÉMENTAIRES									
VARIABLE	pH (unité)	ALCALINITÉ (µéq/l)	CONDUCTIVITÉ (µS/cm)	ALUMINIUM DISSOUS (µg/l)	COULEUR VRAIE (Hazen)	SULFATES (µéq/l)	TANNINS + LIGNINES (mg/l)	COT (mg/l)	$[HCO_3^-]/[SO_4^{--}]$	CAPACITÉ DE LA ROCHE EN PLACE À NEUTRALISER LA CHARGE ACIDE	SECTEUR ÉTUDIÉ	ALTITUDE (m)	EXCÈS DE CATIONS[1] (µéq/l)	INDICE DE SATURATION CALCIQUE	SOMME DES CATIONS (µéq/l)	SUPERFICIE DU LAC (km^2)
ABRÉVIATION	pH	AC	CD	AL	CO	SU	TA	CT	RA	GE	ZO	AT	EX	CS	SC	AB
1	⩽5,9	⩽50	⩽28	⩽30	⩽10	⩽110	⩽0,3	⩽4,5	⩽0,5	FAIBLE	PONTIAC-TÉMISCA-MINGUE SUD	⩽325	⩽125	⩽3,7	⩽220	⩽0,3
2	5,9 - 6,3	50 - 100	28 - 35	30 - 70	10 - 20	110 - 140	0,3 - 0,6	4,5 - 6,0	0,5 - 1,0	MOYENNE	PAPINEAU-LABELLE	325 - 400	125 - 150	3,7 - 4,5	220 - 300	0,3 - 0,5
3	>6,3	>100	>35	>70	>20	>140	>0,6	>6,0	>1,0	ÉLEVÉE	MONT-TREMBLANT	>400	>150	>4,5	>300	>0,5

particulièrement élevées après les trois premiers axes factoriels. Ce regroupement de variables suggère une influence du niveau de minéralisation sur l'acidité du milieu. Par ailleurs, les variables associées à la couleur sont fortement expliquées sur les quatrième et cinquième axes. Ceci semble indiquer un comportement différent de celui des variables précédentes. Finalement, les sulfates sont principalement expliqués au niveau des sixième et septième facteurs. Ce positionnement suggère une différence de comportement entre les sulfates et les autres paramètres. Ainsi, le comportement des sulfates diffère de celui de la conductivité. Il est donc probable que les teneurs en SO_4 proviennent de sources autres que la géologie.

AXES FACTORIELS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
variance observée (pourcentage)	* 25,6	* 14,7	* 13,5	* 11,5	* 8,5	* 8,0	* 6,4	4,2	3,4	1,9
variance observée cumulée (pourcentage)	25,6	40,3	53,8	65,3	73,8	81,8	88,2	92,4	95,8	97,7
variance aléatoire théorique (pourcentage)	19,4	13,9	11,1	9,2	7,8	6,7	5,8	5,0	4,3	3,7

* axes factoriels significatifs et interprétables

Dans le cas des variables supplémentaires, les contributions relatives sont d'autant plus élevées que leur comportement s'apparente à celui des variables actives. Selon le tableau V.3, cinq groupes de variables supplémentaires présentent des contributions relatives cumulées élevées. Ainsi, les contributions relatives des sept premiers axes à l'explication des classes extrêmes de tannins + lignines et de COT sont parti-

TABLEAU V.3: Contributions relatives cumulées des points-paramètres dans l'étude de la physico-chimie des lacs des secteurs du Pontiac-Témiscamingue Sud, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant.

VARIABLES ACTIVES			
VARIABLES	CONTRIBUTIONS RELATIVES CUMULÉES		
	3e axes	5e axes	7e axes
PH1	,807	,877	,880
PH2	,541	,685	,869
PH3	,686	,719	,870
AC1	,634	,862	,898
AC2	,616	,726	,761
AC3	,720	,774	,803
SU1	,455	,635	,936
SU2	,123	,165	,991
SU3	,225	,522	,976
CD1	,687	,858	,906
CD2	,332	,712	,947
CD3	,566	,828	,904
AL1	,607	,900	,917
AL2	,347	,784	,843
AL3	,756	,832	,846
CO1	,504	,814	,874
CO2	,568	,740	,819
CO3	,485	,856	,943

pH = pH
AC = Alcalinité
SU = Sulfates
CD = Conductivité
AL = Aluminium dissous
CO = Couleur

VARIABLES SUPPLÉMENTAIRES			
VARIABLES	CONTRIBUTIONS RELATIVES CUMULÉES		
	3e axes	5e axes	7e axes
TA1	,337	,554	,764
TA2	,284	,361	,409
TA3	,357	,602	,617
CT1	,240	,441	,560
CT2	,165	,196	,296
CT3	,331	,569	,760
RA1	,439	,644	,704
RA2	,178	,285	,376
RA3	,515	,580	,708
GE1	,195	,287	,307
GE2	,117	,171	,365
GE3	,247	,265	,276
ZO1	,089	,438	,629
ZO2	,190	,226	,334
ZO3	,112	,373	,452

TA = tannins + lignines
CT = Carbone total
RA = rapport $[HCO_3^-]/[SO_4^{--}]$
GE = Capacité de la roche en place à neutraliser la charge acide
ZO = Secteur étudié
1: Pontiac-Témiscamingue Sud
2: Papineau Labelle
3: Mont-Tremblay

VARIABLES SUPPLÉMENTAIRES			
VARIABLES	CONTRIBUTIONS RELATIVES CUMULÉES		
	3e axes	5e axes	7e axes
AT1	,268	,336	,572
AT2	,055	,247	,273
AT3	,159	,411	,497
AB1	,042	,106	,237
AB2	,010	,054	,115
AB3	,028	,047	,138
EX1	,183	,371	,446
EX2	,013	,056	,248
EX3	,184	,320	,431
CS1	,688	,734	,821
CS2	,437	,538	,671
CS3	,710	,828	,852
SC1	,481	,607	,673
SC2	,376	,479	,776
SC3	,663	,785	,817

AT = Altitude
AB = Superficie du lac
EX = [CA] + [Mg] - Alcalinité
CS = Indice de saturation calcique
SC = Somme des cations

culièrement élevées. Ceci est dû à la corrélation élevée avec la couleur. Une raison similaire explique les contributions relatives élevées, observées pour le rapport $[HCO_3]/[SO_4]$, l'indice de saturation calcique et la somme des cations. Dans le cas de ces variables, la corrélation est élevée avec le pH, l'alcalinité ou la conductivité. D'autres variables, tels le secteur étudié, l'altitude et l'excès de cations sont peu expliquées sur les cinq premiers axes. Toutefois, des contributions relatives non négligeables, observées sur les sixième et septième axes factoriels, suggèrent un lien potentiel avec les sulfates. Pour terminer, la faiblesse des contributions relatives associées à la superficie du lac semble indiquer que cette variable influence peu la distribution des variables actives.

Étude des groupements de lacs

La classification ascendante hiérarchique, appliquée aux coordonnées des points-stations de chacun des sept axes factoriels significatifs générés par l'AFC, permet de diviser les lacs de la région de l'Outaouais en trois, quatre et sept groupes selon le degré de discrimination voulu. L'arbre hiérarchique résultant et la liste des lacs composant chacun des groupements définis par la CAH sont présentés à la figure V.2. Cette figure donne également la liste des caractéristiques physico-chimiques associées à chacun des groupes ou des super-groupes de lacs. Ces caractéristiques résument ainsi les contributions relatives des paramètres à la formation des classes de lacs qui ont été obtenues par l'application d'une CAH sur les fréquences reconstituées générées par l'AFC. Sur la figure V.2, le symbole (++) définit une contribution relative élevée de la part du paramètre concerné. Le signe (--) indique que l'absence du descripteur contribue fortement à la formation du groupe de lacs. Finalement, les symboles (+) et (-) représentent des contributions relatives mineures mais significatives.

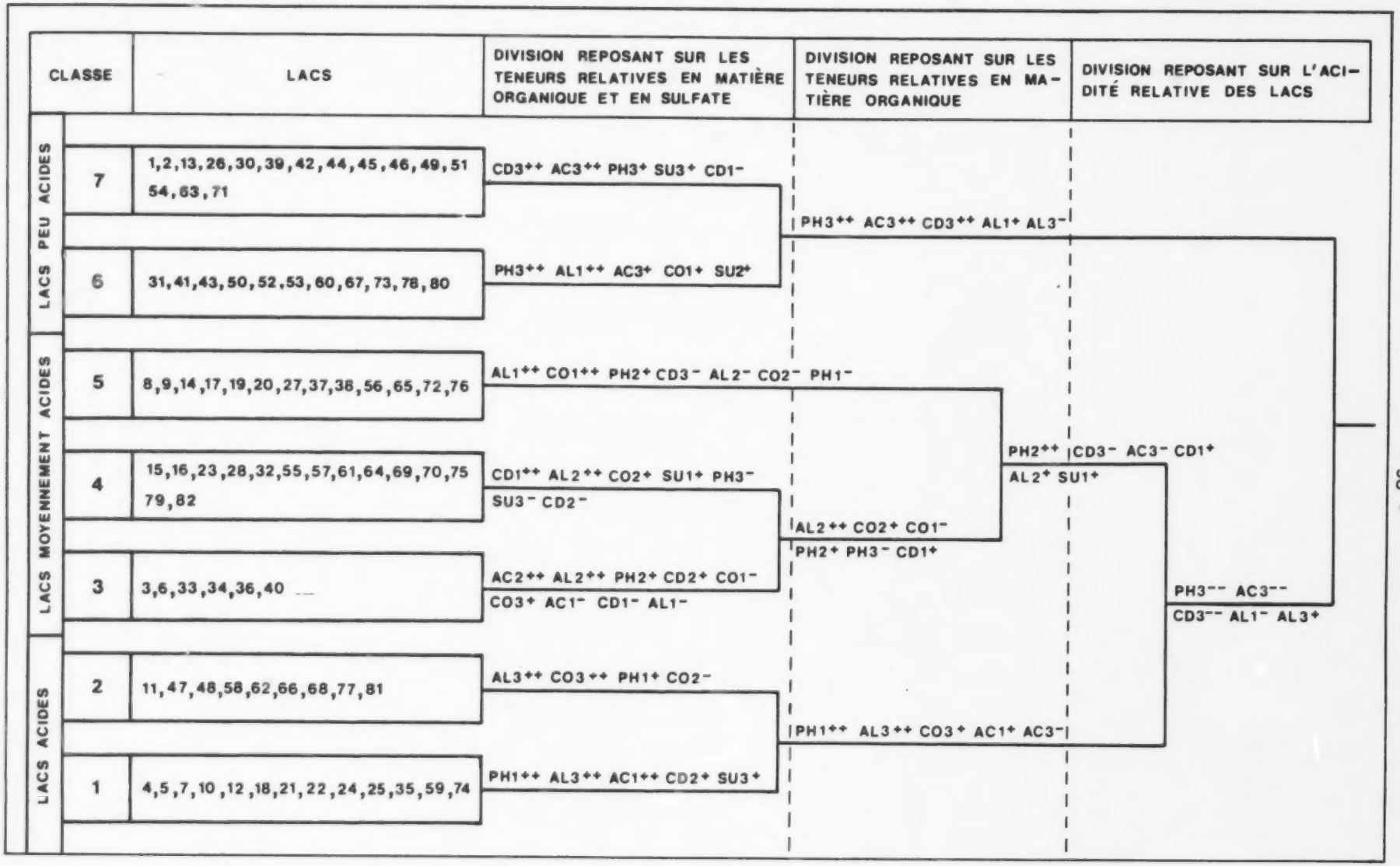


Figure V.2 Classification arborescente de 81 lacs de la région de l'Outaouais définie par la classification ascendante hiérarchique.

Selon la figure V.2, les première et deuxième partitions séparent les lacs sur la base de leur acidité relative. Ainsi, cette division permet d'obtenir trois groupes de lacs; les lacs peu acides (groupes 6 et 7), les lacs moyennement acides (groupes 3, 4 et 5) et les lacs acides (groupes 1 et 2). Par la suite, les troisième et quatrième partitions divisent ces groupes selon les valeurs de couleur ou de sulfates. De cette façon, les lacs moyennement acides sont divisés en trois autres groupes: les lacs où la couleur est inférieure à dix unités hazen (groupe 5), les lacs où la couleur varie entre 10 et 20 unités hazen (groupe 4), et les lacs dont la couleur est supérieure à 20 unités hazen (groupe 3). Quant aux lacs peu acides, ils sont séparés selon leurs teneurs en sulfates. Ainsi, les lacs du groupe 6 présentent des teneurs élevées en sulfates (>140 µéq/l), tandis que celles du groupe 7 sont moyennes (entre 110 et 140 µéq/l). Par ailleurs, les lacs acides se divisent également en deux groupes distincts; les lacs du groupe "1" sont caractérisés par une conductivité moyenne (28 à 35 µS/cm) et des teneurs élevées en sulfates (> 140 µéq/l), tandis que les lacs du groupe 2 affichent plutôt une faible conductivité ($\leq$ 28 µS/cm) et des concentrations moyennes de SO_4 (110 à 140 µéq/l). Le tableau V.4 résume ces observations.

Il semble donc exister deux types de lacs acides. Tout d'abord, les lacs du groupe 1 présentent une acidité élevée, malgré un niveau intermédiaire de conductivité. De plus, ces lacs sont généralement caractérisés par une faible couleur et des teneurs élevées en sulfates. Les lacs du groupe 2 se distinguent par contre du groupe précédent par une faible conductivité, des teneurs moyennes en SO_4 et un niveau élevé de couleur. Il est possible que les lacs du groupe 2 soient de type "organique" où une partie de l'acidité pourrait être d'origine naturelle. D'autre part, les lacs du groupe 1 possèdent plusieurs des caractérisitiques associées aux lacs "acidifiés" par les acides forts, ces acides étant probablement d'origine atmosphérique.

TABLEAU V.4: Synthèse des caractéristiques des classes de lacs formées par la classification ascendante hiérarchique.

SUPER GROUPE DE LACS	GROUPE DE LACS	pH	ALCALINITÉ	CONDUCTIVITÉ	SULFATES	COULEUR	ALUMINIUM DISSOUS
LACS PEU ACIDES	7	3[1]	3	3	2	1	1
(32 pour cent)	6	3	3	3	3	-	1
LACS MOYENNEMENT ACIDES (41 pour cent)	5	2	2	1	-	1	-
	4	2	2	1	1	2	2
	3	2	2	2	-	3	2
LACS ACIDES	2	1	-	1	2	3	3
(27 pour cent)	1	1	1	2	3	-	3

1: Valeur moyenne = 1 = faible
2 = moyenne
3 = élevée
- = indéterminée

La figure V.3 présente une image conceptuelle de la distribution des points-paramètres, des lacs et des groupes de lacs sur les deux premiers axes factoriels, lesquels expliquent 40 pour cent de la variabilité physico-chimique. Cette figure met en relief la proximité de certains groupes de lacs et de certains paramètres. Ainsi, les lacs acides des groupes 1 et 2 se positionnent près des points-paramètres PH1 (faible pH), AC1 (faible alcalinité) et AL3 (aluminium élevé). Cependant, les lacs du groupe 2 sont également localisés près de la variable CO3 (couleur élevée). Par ailleurs on note une faible distance entre les groupes 3, 4 et 5 et les descripteurs CD1 (faible conductivité), SU1 (faibles teneurs en sulfates), PH2 (pH moyen), AL2 (teneur moyenne d'aluminium), CO2 (couleur moyenne). Finalement, les deux derniers groupements de lacs (groupes 6 et 7) sont associés aux variables AL1 (faible teneur en aluminium), PH3 (pH élevé), AC3 (forte alcalinité) et CD3 (forte conductivité).

La figure V.3 nous permet également d'observer la position relative des variables supplémentaires dans le continuum factoriel. Ainsi, les lacs acides (groupes 1 et 2) sont caractérisés par un faible rapport $[HCO_3]/[SO_4]$ et un indice de saturation calcique supérieur à 4,5. De plus, il semble que ces lacs soient associés à une altitude intermédiaire et à une géologie dont la capacité à neutraliser la charge acide est minime. Les lacs acides des groupes 1 et 2 seraient surtout localisés dans le secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud. Par ailleurs, les tannins + lignines et le carbone organique total seraient particulièrement élevés dans certains de ces lacs. Les lacs des groupes 3, 4 et 5 sont généralement caractérisés par des valeurs physico-chimiques intermédiaires. Toutefois, les valeurs de sulfates, de conductivité et de la somme des cations sont relativement faibles. Ces lacs seraient surtout situés à une altitude supérieure à 400 mètres dans le secteur du parc du Mont-Tremblant où la géologie possède une capacité intermédiaire à neutraliser la

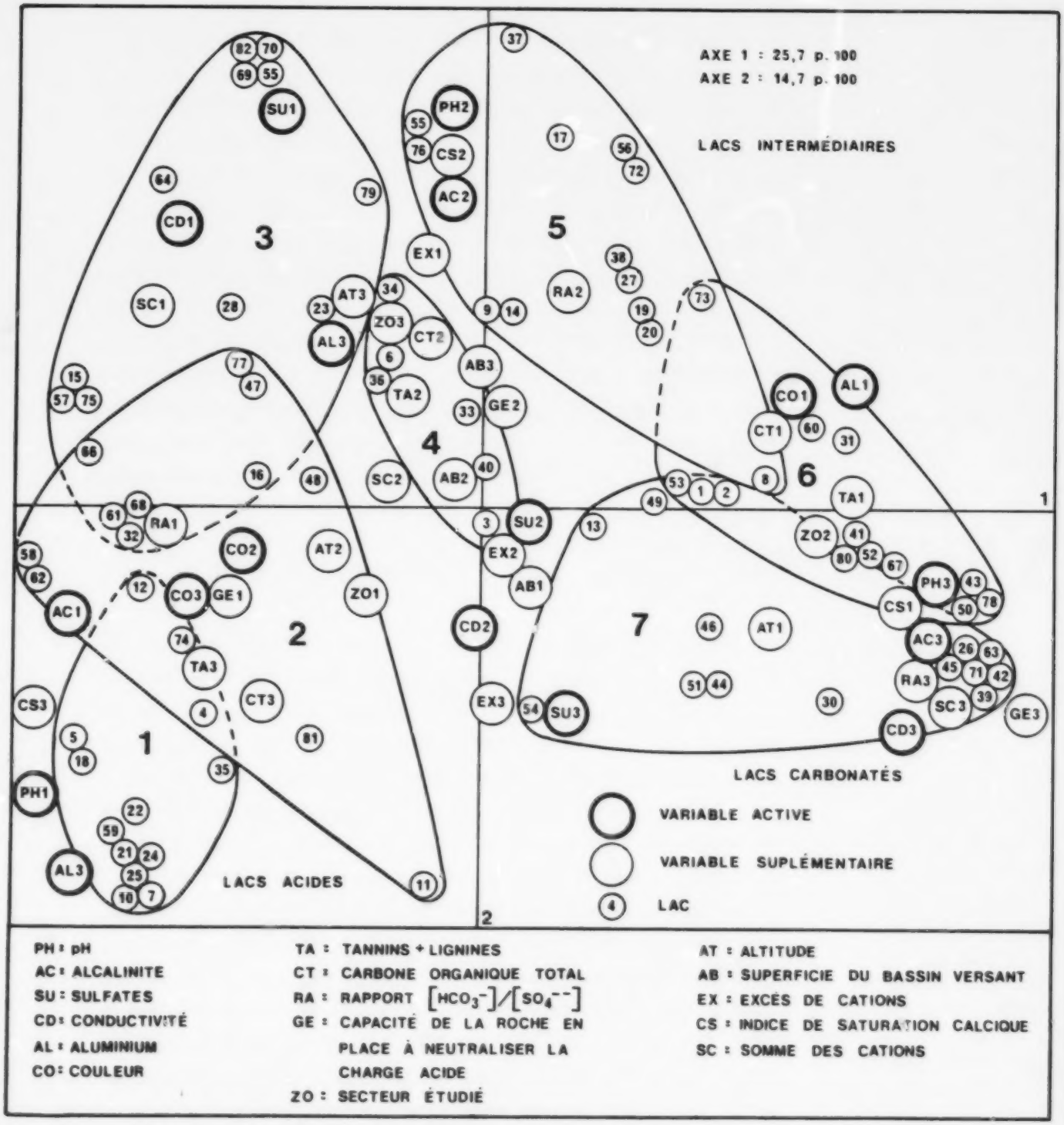


Figure V.3 Représentation des points-paramètres (variables actives et supplémentaires) et des groupements de lacs définis par la CAH, selon les premier et deuxième axes factoriels.

charge acide. Finalement, les lacs peu acides des groupes 6 et 7 sont fortement minéralisés (PH3, AC3, CD3, CS1, RA3, SC3). De plus, les valeurs de couleur, de tannins + lignines et de COT sont peu élevées. Par contre, les concentrations de sulfates sont parfois élevées. Les lacs de ces classes se situeraient majoritairement en basse altitude, dans le secteur de Papineau-Labelle et sur des roches à forte capacité à neutraliser la charge acide.

Les sulfates ont un comportement particulier. Par la position du descripteur SU3, les fortes concentrations de SO_4 influenceraient la formation des groupements de lacs acides et peu acides. Par ailleurs, la superficie du lac et l'excès de cations ne semblent jouer aucun rôle distinct sur la formation des groupes.

5.2.2 COMPARAISON DES LACS DE L'OUTAOUAIS AVEC LA CLASSIFICATION DES LACS DE LA RÉGION DE ROUYN-NORANDA

Le deuxième type d'analyse multivariée vise à comparer la physico-chimie des lacs de la région de l'Outaouais avec la classification des lacs de la région de Noranda obtenue par la CAH (Dupont, 1984a). Trois raisons nous ont incité à effectuer une telle comparaison. Tout d'abord, la zone couverte par l'étude des lacs de la région de Noranda englobe les trois secteurs étudiés dans la région de l'Outaouais. Deuxièmement, la classification des lacs de Noranda considère une gamme variée de types lacustres. Finalement, cette classification a déjà servi pour la comparaison des lacs de la réserve faunique La Vérendrye.

La méthode et le mode de traitement utilisés pour cette comparaison sont essentiellement les mêmes que ceux décrits à la section 5.2.1. Toutefois, nous ne donnons aucun poids statistique aux lacs de la région de l'Outaouais et ce, afin de préserver la classification originale des lacs de la

région de Noranda. Néanmoins, l'analyse factorielle permet de représenter graphiquement la position des lacs des deux régions sur une même figure. Par la suite, une comparaison des coordonnées factorielles de chacun des lacs permet d'associer les lacs de la région de l'Outaouais aux sept groupements définis par la CAH.

Le pH, l'alcalinité, la conductivité, l'aluminium dissous et les sulfates ont été choisis comme variables actives pour les mêmes raisons que celles invoquées à la section 5.2.1. Toutefois, contrairement à l'analyse précédente, aucune variable supplémentaire n'a été considérée pour la comparaison. Par la suite, les valeurs spécifiques à chacun des paramètres ont été divisées et codifiées sous un format binaire, selon quatre classes quasi-équiprobables, dont les seuils sont présentés au tableau V.5.

Le tableau V.6 résume les résultats de la comparaison des lacs des régions de Noranda et de l'Outaouais. Sur ce tableau, on peut observer la liste des lacs de la région de l'Outaouais associée à chacun des sept groupements potentiels. De plus, nous avons reproduit les caractéristiques physico-chimiques de chacun de ces groupements afin de faciliter l'interprétation. Il faut noter que les lacs appartenant aux premier et deuxième groupes sont acides et affectés par les sulfates. Les lacs associés aux groupes R3, R4 et R5 sont moyennement acides. Parmi ces groupes, la classe R3 contient des lacs vulnérables à l'acidification, mais qui sont peu affectés par l'action des acides forts. Le groupe R4 contient des lacs moyennement vulnérables à l'acidification, mais dont le degré d'agression par les acides forts est relativement élevé. Par ailleurs, les lacs du groupe R5 sont moyennement vulnérables à l'acidification et moyennement affectés par les sulfates. Finalement, les lacs appartenant aux groupes R6 et R7 sont généralement peu acides et peu vulnérables à l'acidification. Toutefois, l'action des acides

TABLEAU V.5: Valeurs des seuils utilisés pour chaque variable dans la codification des données observées dans les lacs de la région de Noranda.

BORNES INFÉRIEURES ET SUPÉRIEURES DES CLASSES						
PARAMÈTRES		pH (unité)	ALCALINITÉ (µéq/l)	CONDUCTIVITÉ (µS/cm)	SULFATES (µéq/l)	ALUMINIUM EN SOLUTION (µg/l)
ABRÉVIATION		PH	AC	CD	SU	AL
CLASSE	1	≤5,7	≤40	≤25	≤100	≤50
	2	5,7 - 6,1	40 - 80	25 - 40	100 - 150	50 - 100
	3	6,1 - 6,4	80 - 200	40 - 75	150 - 220	100 - 200
	4	>6,4	>200	>75	>220	>200

TABLEAU V.6: Association des lacs de l'Outaouais aux groupements définis par la classification ascendante hiérarchique des lacs de la région de Rouyn-Noranda et présentation des principales caractéristiques physico-chimiques de ces groupements.

#	NUMÉRO DE LA CLASSE DE LACS	NUMÉRO DE LAC	CARACTÉRISTIQUES DE LA CLASSE
R1	111	74, 32	PH1++. AC1++, AL4++, SU4+, CD2+
R2	119	12, 15, 16, 18, 24, 57, 58, 61, 68	AC1++, PH1++, CD1+, CD3-, AL2+, AL3+
R3	120	4, 5, 7, 9, 10, 17, 21, 22, 23, 28, 34, 35, 47, 55, 59, 62, 64, 65, 66, 69, 70, 75, 76, 77, 81	CD1++, PH2++, AC2++, SU1+
R4	115	1, 3, 6, 19, 20, 25, 26, 36, 82	SU3++, AC2++, CD2++
R5	117	2, 8, 11, 13, 14, 27, 30, 31, 33, 37, 38, 40, 41, 46, 48, 49, 52, 53, 54, 56, 60, 67, 72, 73, 79, 80	AC3++, AL2++, PH3+, AL3-, AL1-
R6	121	39, 42, 43, 44, 50, 51, 63, 71, 78,	CD3++, AC4++, SU2++, AL2-
R7	118	45	CD4++, PH4++, AC4++, AL3++, SU2-, SU4+

R: Rouyn-Noranda

forts serait particulièrement marquée pour les lacs du groupe R7. On devra se référer au rapport de Dupont (1984a) pour une description plus détaillée des résultats de l'analyse multivariée portant sur les lacs de la région de Noranda.

Selon le tableau V.6, la majorité des lacs de la région de l'Outaouais (74 pour cent) se classerait au niveau des groupes R3, R4 et R5, lesquels sont considérés comme étant moyennement acides. Toutefois, le degré d'agression par les sulfates diffère quelque peu selon le groupe. Ainsi, 31 pour cent des lacs de la région de l'Outaouais sont associés au groupe R3. Malgré une sensibilité élevée à l'acidification, ces lacs ne seraient que moyennement affectés par les apports acides. Fait à noter, près de la moitié de ces lacs sont situés dans le secteur du parc du Mont-Tremblant, lequel s'avère le plus distant des sources potentielles d'émission de SO_2. D'autre part, onze des 60 pour cent de lacs moyennement vulnérables à l'acidification seraient affectés par des teneurs relativement élevées en sulfates (groupe R4). La majorité de ces lacs est située dans le secteur du Pontiac-Témiscamingue. Le dernier groupe de lacs moyennement acides (groupe R5) contient généralement des lacs bien tamponnés qui possèdent des teneurs variables en sulfates.

Il existe onze lacs acides répartis dans deux classes distinctes. Ainsi, deux lacs acides seraient affectés par de très fortes teneurs en sulfates. Les neuf autres lacs acides seraient plutôt affectés par des teneurs variables de sulfates. Fait à noter, la majorité de ces lacs se trouve dans les secteurs vulnérables du Pontiac-Témiscamingue et du parc du Mont-Tremblant.

Dix lacs répondent à la description des lacs peu acides. Ainsi, ces lacs possèdent tous un pH, une alcalinité et une conductivité élevés. Par ailleurs, neuf lacs seraient caractérisés par des teneurs moyennes de SO_4^{--}, tandis qu'un seul

lac (lac 45: groupe R7) serait fortement affecté par les sulfates. Fait à noter, la majorité des lacs peu acides est située dans le secteur de Papineau-Labelle où certains types de roche contiennent du calcaire cristallin.

La figure V.4 présente une image conceptuelle des deux premiers axes factoriels de la distribution comparée des lacs de la région de l'Outaouais et de la région de Noranda. Cette figure met en évidence l'appartenance d'un grand nombre de lacs de la région de l'Outaouais aux groupes R3, R4, R5 de la classification des lacs de Noranda. Il en est de même pour une dizaine de lacs associés aux classes R1 et R2. Ces résultats concordent avec ceux de Dupont (1984a). En fait, la transposition des résultats de la CAH sur la carte de localisation des lacs de la région de Noranda montrait que la majorité des lacs situés au sud de Noranda appartenait à ces mêmes groupes de lacs. Toutefois, comparativement aux résultats obtenus par cet auteur, la présente étude met en relief la présence d'un plus grand nombre de lacs peu acides. Cette divergence s'explique par la faible densité des lacs échantillonnés pour l'étude de Noranda et par la faible étendue de la zone géologique associée au calcaire cristallin.

5.2.3 SYNTHÈSE DES ANALYSES MULTIVARIÉES

Les analyses multivariées décrites précédemment ont plusieurs points en commun, bien que la couleur n'ait pas été considérée pour celle des lacs de Noranda. La gamme des valeurs de paramètres étant plus grande pour la classification des lacs de Noranda, les lacs de l'Outaouais se sont ainsi concentrés au niveau de quelques groupements spécifiques. Par exemple, 74 pour cent des lacs de l'Outaouais s'identifiaient à trois des sept groupes. Selon la classification de Noranda, 13,6 pour cent des lacs de l'Outaouais sont acides et affectés par les sulfates, 30,9 pour cent des lacs de cette région seraient également très vulnérables et moyennement affectés

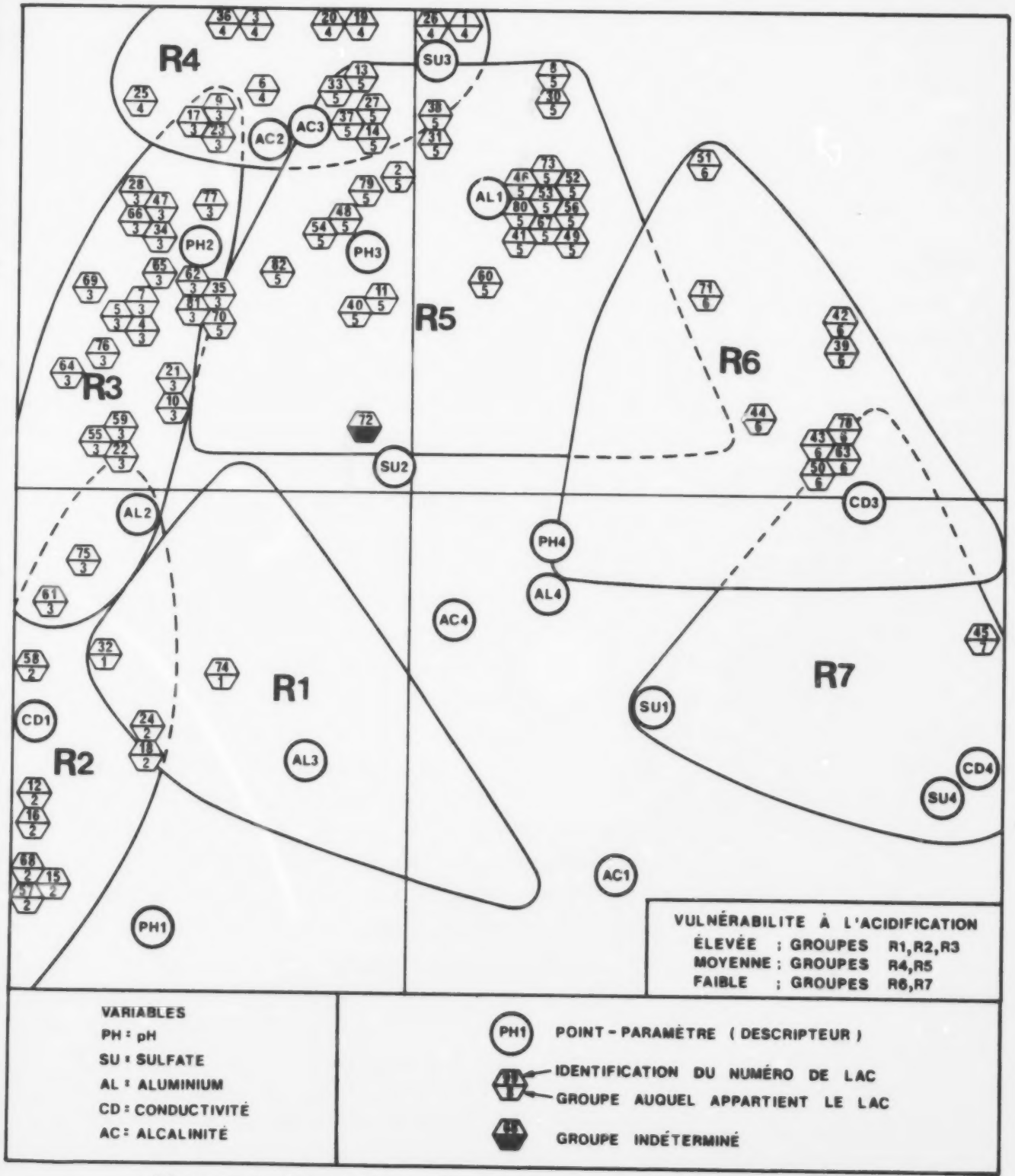


Figure V.4 Comparaison, selon les deux premiers axes factoriels, de la distribution des lacs de l'Outaouais avec la classification des lacs de la région de Noranda.

par les apports atmosphériques. Par ailleurs, 43,2 pour cent des lacs présentent une vulnérabilité moins grande à la charge acide, mais les teneurs en sulfates y demeurent élevées. Finalement, seuls 12,3 pour cent des lacs de l'Outaouais seraient peu vulnérables à l'acidification malgré les fortes teneurs en SO_4 qu'on y observe.

Seule l'analyse réalisée sur les lacs de la région de l'Outaouais seule s'avère plus détaillée. En se basant sur les seuils de pH présentés au tableau V.2, cette région compterait 27 pour cent de lacs acides dont près de 60 pour cent auraient été acidifiés par les apports atmosphériques. La région de l'Outaouais présenterait également 41 pour cent de lacs moyennement acides ou vulnérables, tandis que 32 pour cent des lacs de la région seraient peu acides. Sur ces 32 pour cent, 13,5 pour cent seraient peu vulnérables à l'acidification.

En résumé, les deux approches montrent qu'un pourcentage significatif de lacs ont déjà été affectés par les apports acides. De plus, lorsqu'on compare les résultats des analyses faites à partir des lacs de Noranda et de l'Outaouais, on remarque que la région de Noranda présente une plus grande diversité de lacs. En fait, la majorité des lacs de l'Outaouais se classerait dans trois des sept classes formées par les lacs de Noranda, ces classes étant caractéristiques de lacs très vulnérables à moyennement vulnérables à l'acidification. La distinction entre les lacs de Noranda et de l'Outaouais tient surtout au fait que la région de l'Outaouais ne compte presque aucun lac peu vulnérable à l'acidification. De même, les lacs extrêmement vulnérables et très acides y sont également peu fréquents.

5.3 ANALYSE DISCRIMINANTE

L'analyse discriminante a été considérée dans le but de déterminer l'existence d'une relation entre la nature géologique des bassins

versants et la qualité des eaux lacustres de la région de l'Outaouais. Pour y arriver, nous avons utilisé la méthode décrite par W. R. Klecka, que l'on retrouve dans Nie et al. (1975). Selon Klecka, l'objectif mathématique de l'analyse discriminante est de pondérer et de combiner linéairement les variables discriminantes de façon telle que les groupes soient aussi statistiquement différents que possible. En fait, la distinction entre les groupes est d'autant plus nette que les moyennes des variables discriminantes associées à chacun des groupes sont grandement différentes.

Dix variables discriminantes ont été choisies pour l'analyse: la concentration en ions H^+, l'alcalinité, le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, les sulfates, le fer, le manganèse et l'aluminium dissous. Les concentrations de chacun de ces paramètres pourraient être influencées par l'altération chimique des minéraux sur le bassin versant. Par ailleurs, l'une des conditions de base à l'application de l'analyse discriminante est la linéarité de la distribution des variables. Toutefois, plusieurs des variables citées précédemment ne répondent pas à ce critère. Leurs valeurs ont dû alors être transformées mathématiquement afin d'acquérir la normalité. Parmi ces variables, seuls les sulfates présentent une distribution normale. Ce paramètre n'a donc pas subi de transformation. Parmi les autres descripteurs, le calcium, le magnésium, le sodium, le potassium, le fer et l'alcalinité ont subi une transformation logarithmique. La concentration en ions H^+ a été transformée selon le logarithme en base dix d'une fonction puissance ($\log_{10}([H^+]+1)^{0,2}$). Par ailleurs, la normalisation s'est avérée impossible pour l'aluminium et le manganèse, mais nous les avons tout de même considérés en raison de la grande flexibilité de l'analyse discriminante.

La région de l'Outaouais est caractérisée par une grande diversité géologique. Sur les 81 bassins versants étudiés, pas moins de 15 types de roches ont été identifiés (voir annexe 1). Dans l'analyse

discriminante, il aurait été difficile d'utiliser un si grand nombre de classes, d'autant plus que la géologie de chaque bassin versant est généralement composée de plusieurs types de roche. Pour contourner ce problème, nous avons groupé les espèces géologiques selon leur altérabilité chimique et leur capacité à neutraliser les acides. Ainsi, en se basant sur la classification minérale de Shilts et al. (1981), sur les résultats des analyses discriminantes effectuées par Dupont (1984a, 1984b) et sur divers documents traitant d'hydrogéologie et de géochimie (Gorham, 1961; Miller, 1961; Feth et al., 1964; Dawdy et Feth, 1967; Conroy et Keller , 1976), nous avons défini trois niveau d'altérabilité; les roches peu altérables, les roches moyennement altérables et les roches très altérables. Les roches altérables sont associées aux gneiss et aux quartzites de la série de Grenville, lesquels contiennent du calcaire cristallin. Leur capacité à neutraliser la charge acide est très élevée. D'autre part, les roches moyennement altérables regroupent surtout des roches métasédimentaires et alcalines; gneiss mixtes, gneiss quartzofeldspathique, paragneiss, gabbro, métagabbro, diorite, granodiorite, amphibolite et migmatite. Ces roches peuvent générer une capacité intermédiaire de neutralisation des charges acides. Finalement, les roches peu altérables, ne générant qu'une faible capacité à neutraliser la charge acide, sont associées aux roches ignées acides ou aux gneiss riches en éléments ferro-magnésiens; gneiss à biotite, gneiss à hornblende, gneiss grenatifère, syénite et granite.

L'analyse discriminante appliquée sur trois classes géologiques permet de définir deux fonctions discriminantes dont les coefficients sont présentés au tableau V.7. L'influence des variables sur les fonctions discriminantes se mesure à la valeur des coefficients.

La première fonction discriminante contribue à l'explication de 87 pour cent de la distribution physico-chimique et s'avère significative à un niveau de confiance $\alpha = 0,01$. Par contre, la deuxième

fonction n'explique que 13 pour cent de la variabilité expliquée, mais demeure tout de même significative au niveau de confiance $\alpha = 0,05$. D'autre part, l'examen de la probabilité au non-dépassement de chacune des variables indique que six descripteurs sont significatifs au niveau de confiance $\alpha = 0,01$. Ces variables sont le calcium, l'alcalinité, la concentration en ions H^+, le magnésium, l'aluminium et le fer. De plus, les sulfates sont significatifs au niveau de confiance $\alpha = 0,05$. Les autres variables, tels le manganèse, le potassium et le sodium, ne sont pas significatives et ne seront donc pas considérées dans l'interprétation.

L'examen du tableau V.7 montre que, relativement à la nature géologique, le calcium est la variable physico-chimique déterminante.

TABLEAU V.7: Présentation des coefficients des fonctions discriminantes associés à l'analyse discriminante de la physico-chimie des lacs de la région de l'Outaouais, selon la nature de la géologie du bassin versant.

	DESCRIPTEUR	NIVEAU DE SIGNIFICATION	COEFFICIENTS DE LA FONCTION DISCRIMINANTE	
			FONCTION 1	FONCTION 2[1]
VARIABLES SIGNIFICATIVES AU NIVEAU DE CONFIANCE $\alpha = 0,01$	CALCIUM	0,000	1,37●	0,28
	$[H^+]$	0,000	-0,52●	1,08●
	MAGNÉSIUM	0,001	-0,51●	-0,64●
	ALCALINITÉ	0,000	-0,28	0,48
	ALUMINIUM	0,005	-0,04	0,19
	FER	0,007	-0,20	-0,65●
VARIABLE SIGNIFICATIVE AU NIVEAU DE CONFIANCE $\alpha = 0,05$	SULFATES	0,016	-0,37	0,58●
VARIABLES NON SIGNIFICATIVES AUX NIVEAUX DE CONFIANCE $\alpha = 0,01$ et 0,05	MANGANÈSE	0,108	0,50	0,21
	POTASSIUM	0,150	0,14	0,22
	SODIUM	0,718	0,08	-0,11

1 la fonction 2 est significative au niveau de confiance $\alpha = 0,05$
● coefficient supérieur à 0,50

En fait, son coefficient associé à la première fonction discriminante est très élevé (1,37). D'autre part, les teneurs en ions H+ et en magnésium sont également des paramètres très importants sur cette fonction. Sur la deuxième fonction discriminante, c'est la teneur en ions H+ qui est principalement mise en évidence, suivie du fer, du magnésium et des sulfates. Fait à noter, aucune des deux fonctions discriminantes ne semble dépendante de l'aluminium, puisque la valeur des coefficients demeure relativement faible.

La figure V.5 présente le positionnement relatif des lacs de la région de l'Outaouais, selon les deux fonctions discriminantes et la géologie des bassins versants. Ainsi, l'axe 1 traduit le niveau de minéralisation et la vulnérabilité des lacs à l'acidification. Selon cette figure, les lacs associés aux roches altérables sont caractérisés par de faibles teneurs en ions H+ et en magnésium et par une concentration élevée de calcium. Le contraire est observé pour les lacs associés aux roches peu altérables. Un tel comportement suggère que moins les roches d'un bassin versant sont altérables, plus le lac est acide (teneurs élevées en ions H+). D'autre part, la deuxième fonction discriminante traduit l'acidité relative des lacs et le degré d'agression par les sulfates. Ainsi, selon cet axe, plus les teneurs en sulfates sont élevées, pour une concentration fixe en calcium, et plus l'acidité est grande. Par ailleurs, cette figure met en évidence l'importance des teneurs en sulfates dans les lacs associés aux roches altérables et peu altérables. Il faut rappeler l'existence probable d'une contribution naturelle de sulfates dans les roches très altérables.

L'analyse discriminante montre que la considération des trois types de roche décrits précédemment permet de classer correctement 77,5 pour cent des lacs. Ce pourcentage est inférieur à celui obtenu par Dupont (1984b) pour les lacs de Portneuf (88 pour cent). Ce moindre pourcentage d'efficacité peut être attribuable à plusieurs causes. Tout d'abord, la nature des dépôts superficiels peut différer de celle de la roche en place. Par exemple, plusieurs lacs du sec-

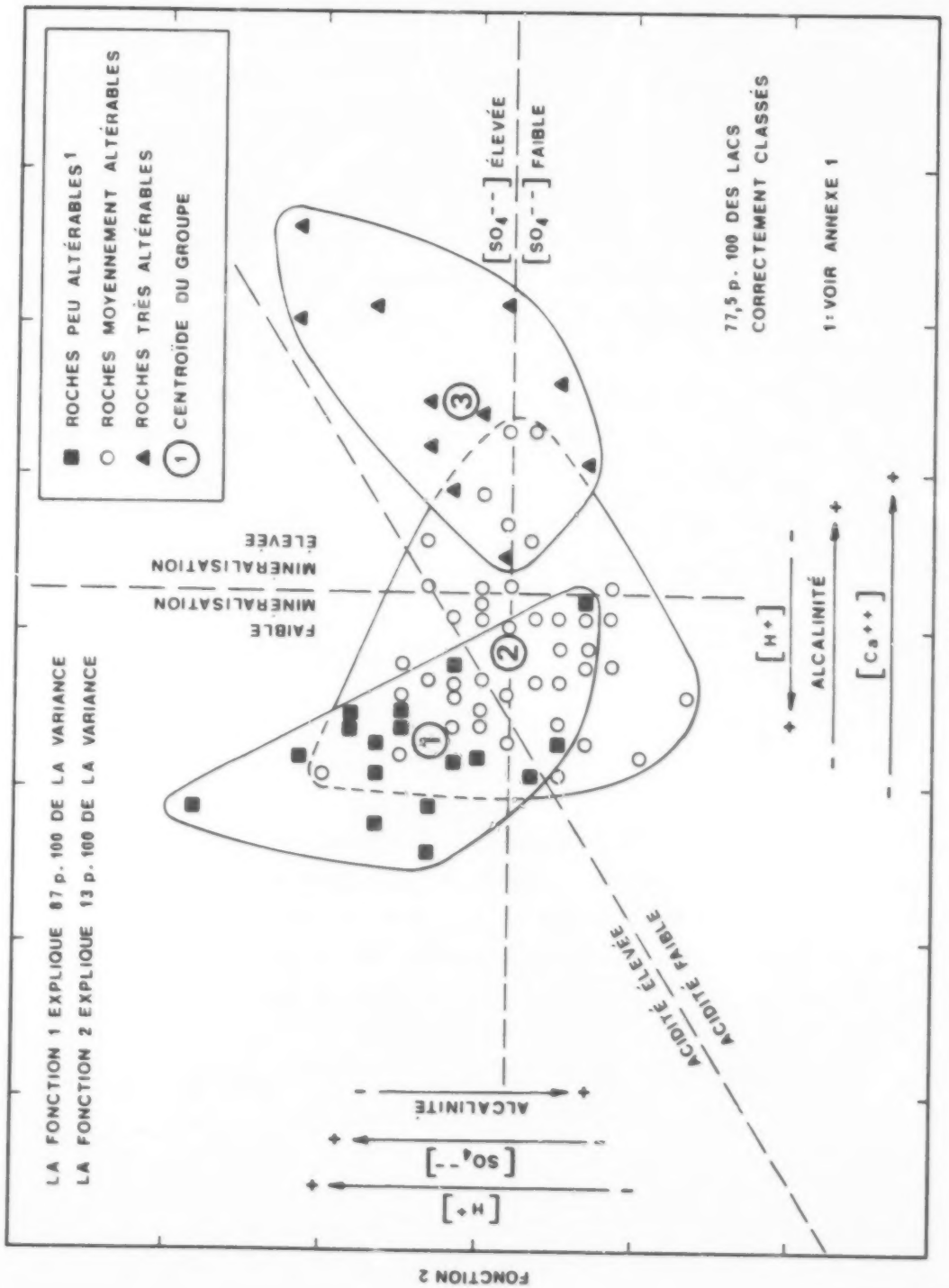


Figure V.5 Application de l'analyse discriminante à la physico-chimie des lacs de la région de l'Outaouais, selon la nature de la géologie du bassin versant.

teur du Pontiac-Témiscamingue Sud, caractérisés par des teneurs élevées en sulfates et reposant sur des roches peu altérables, devraient s'avérer très vulnérables. Ce n'est pourtant pas le cas puisque l'alcalinité et le pH sont élevés. Dans leur cas, il est possible que les tills glaciaires contiennent des éléments carbonatés. D'autre part, la haute complexité géologique de la région étudiée peut avoir des répercussions sur une telle classification. De plus, des facteurs, telles la précision et la disponibilité des cartes géologiques ainsi que l'importance relative accordée à chacun des types géologiques, peuvent apporter une certaine imprécision.

La considération d'un nombre de classes différent entre l'étude présente (trois) et celle de Dupont (1984b) (quatre) ne devrait pas être responsable de la différence dans le pourcentage de réussite. En fait, la probabilité de réussite décroît généralement avec l'augmentation du nombre de classes et ce, en raison de l'accroissement des probabilités d'erreur. Ce n'est pas le cas présentement puisque l'étude de Dupont (1984b) présente un plus haut taux de réussite malgré un plus grand nombre de classes. La raison de cette disparité serait beaucoup plus attribuable aux facteurs cités au paragraphe précédent.

CHAPITRE VI

MODÈLES

Cette section termine l'analyse des données physico-chimiques de 81 lacs de la région de l'Outaouais. Dans ce chapitre, nous appliquons trois types de modèles empiriques afin de tenter d'estimer le niveau d'acidification généré par l'action de l'acide sulfurique.

6.1 MODÈLE DE KRAMER ET TESSIER

La majorité des modèles empiriques cités dans la littérature propose une version très simplifiée des processus d'acidification à l'oeuvre. La plupart de ces modèles reposent sur des hypothèses peu représentatives de la réalité. Kramer et Tessier (1982) ont établi une liste de ces hypothèses en leur apportant une critique sévère. Il ressort de leur étude qu'un modèle devrait tenir compte de tous les cations majeurs et de la pression partielle en CO_2. Ainsi, en tenant compte de ces facteurs, ils ont modifié l'approche utilisée par Henriksen (1979), laquelle était caractérisée par une relation entre le pH mesuré et la concentration de calcium.

Le modèle de Kramer et Tessier (1982) repose sur une relation entre le pH corrigé pour la pression partielle en CO_2 et le pH calculé à partir de la somme des cations majeurs et des constantes de dissociation de l'acide carbonique. Le pH corrigé pour la pression partielle en CO_2 est estimé par l'équation suivante:

$$\text{pH (corrigé)} = \text{pH (mesuré)} + \log_{10} pCO_2 \text{ (actuel)} - \log_{10} pCO_2 \text{ (fixé)} \qquad (6.1)$$

où pH (mesuré) = pH mesuré en laboratoire

pCO_2 (fixé) = pression partielle de CO_2 fixée à l'avance (dans le cas présent, le $\log_{10} pCO_2 = -2{,}5$)

pCO_2 (actuel) = pression partielle de CO_2

La pression partielle de CO_2 peut être calculée à partir de l'alcalinité et de la concentration en ions H^+:

$$\log_{10} pCO_2(\text{actuel}) = \log_{10} \left[\frac{[H^+]^2 \left([ALC] - \left[\frac{K_w}{[H^+]}\right] + [H^+]\right)}{K_1 K_h ([H^+] + 2K_2)} \right] \qquad (6.2)$$

où $[H^+]$ = 10^{-pH} (mesuré)

$[ALC]$ = alcalinité totale = $[ALC](mg/l\ CaCO_3) \div 50\ 000$

K_w = constante de dissociation de l'eau ($10^{-14,00}$)

K_1 = première constante de dissociation de l'acide carbonique ($10^{-6,37}$)

K_2 = deuxième constante de dissociation de l'acide carbonique ($10^{-10,37}$)

K_h = constante d'équilibre pour la solubilisation du CO_2 gazeux ($10^{-1,42}$)

L'utilisation de cette équation est valable en faisant l'hypothèse que la force ionique est nulle et que la température est de 21 °C.

Le pH calculé à partir de la somme des cations est obtenu par l'équation suivante.

$$pH\ (\text{calculé}) = (\log_{10} \sum z_i [m_i]) - \log_{10} {}^*K - \log_{10} pCO_2\ (\text{fixé})$$

où $[m_i]$ = concentration de cations majeurs (moles/l)

z_i = charge de chacun des cations

$^*K$ = $K_1 K_h$

Selon ce modèle, un lac dont le bassin versant est uniquement soumis à l'altération chimique des minéraux par l'acide carbonique se positionnerait près de la droite d'équivalence où le pH corrigé est égal au pH calculé. Un écart à cette droite indiquerait la présence d'une autre source d'ions H^+ pouvant être liée à l'action d'acides forts, tel l'acide sulfurique.

La figure VI.1 présente la relation graphique entre le pH corrigé et le pH calculé pour les lacs de la région de l'Outaouais. Afin de raffiner l'interprétation, nous avons identifié chacun de ces lacs aux groupes qui ont été définis par l'analyse multivariée (voir section 5.2.1). Ainsi, les lacs appartenant aux groupes 1 et 2 sont acides. Les lacs associés aux groupes 3, 4 et 5 sont moyennement acides, tandis que les deux derniers groupes (6 et 7) caractérisent les lacs peu acides.

Selon la figure VI.1, la majorité des lacs de la région de l'Outaouais serait affectée ou acidifiée par l'action d'acides forts. Toutefois, le degré d'acidification varie selon les groupes de lacs. Ainsi, les lacs du groupe 1 présentent les plus grands écarts de pH, ces derniers atteignant parfois 1,3 unité de pH. Par contre, les lacs non acides des groupes 6 et 7 présentent tous des écarts inférieurs à 0,5 unité de pH. Pour les lacs des autres groupes, les écarts varient entre 0,5 et 0,8 unité.

Plusieurs des lacs moyennement vulnérables et moyennement acides du groupe 4 présentent des écarts de pH supérieurs à 0,7. Un examen minutieux montre que la plupart de ces lacs sont situés dans le secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud, tandis que ceux présentant des écarts inférieurs à 0,65 unité sont surtout localisés dans le secteur du Mont-Tremblant. Une telle disparité pourrait être associée aux teneurs relatives de sulfates. Ainsi, les plus grandes concentrations de sulfates observées dans le secteur du Pontiac-Témiscamingue Sud seraient à l'origine des plus grands écarts de pH et donc d'une acidification plus poussée.

Les lacs du groupe 2 sont également problématiques. Ils figurent parmi les lacs les plus acides de la région de l'Outaouais, mais présentent généralement des écarts de pH inférieurs à 0,7 unité. Certains de ces écarts sont même inférieurs à 0,5 unité de pH, ce qui est l'indice que l'acidification entrainée par l'action des aci-

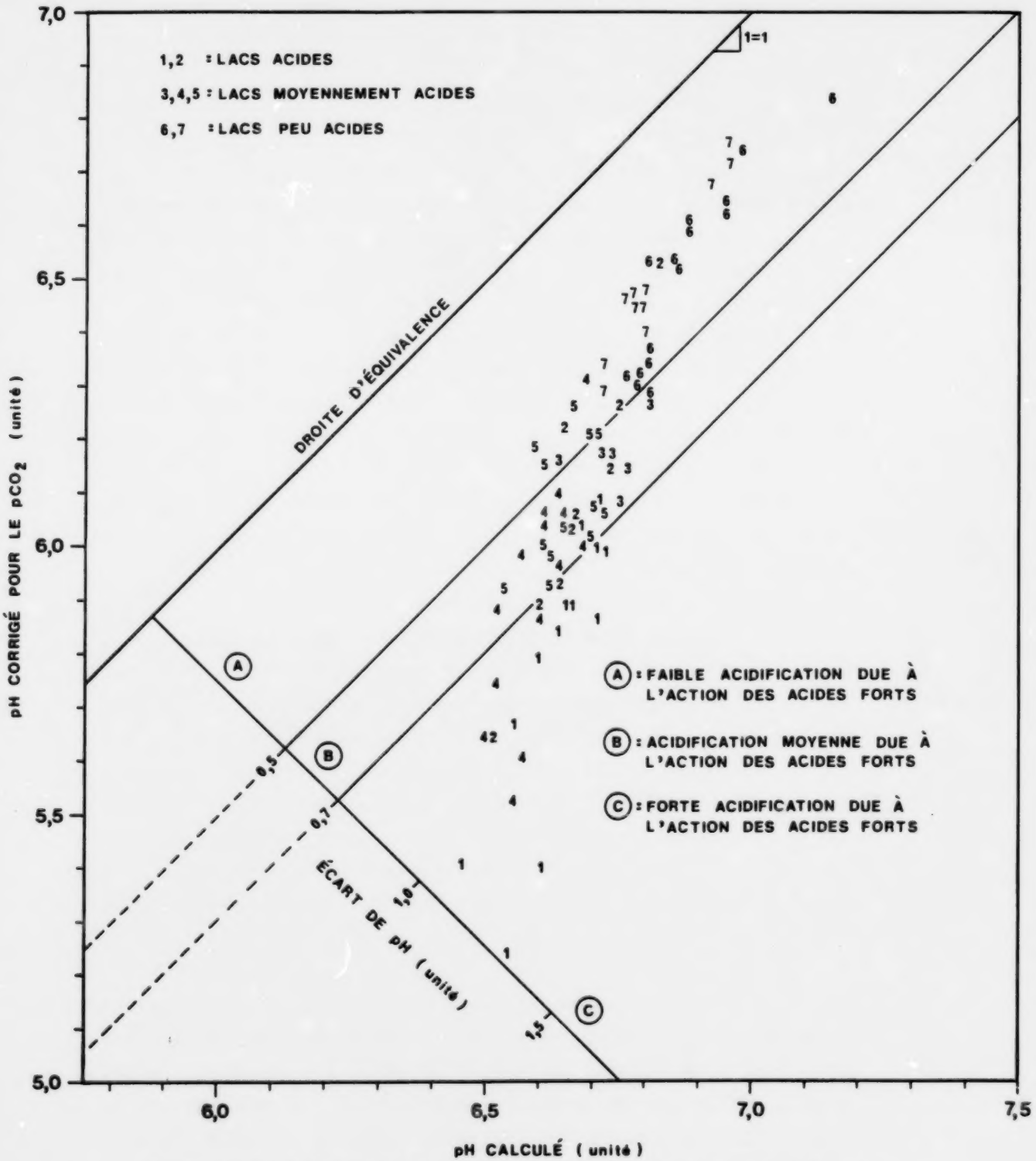


Figure VI.1 Application du modèle de Kramer et Tessier (1982) selon la classification ascendante hiérarchique de 81 lacs de la région de l'Outaouais.

des forts n'aurait pas été aussi importante que celle encourue par les autres lacs acides du groupe 1. Il serait donc probable, si on s'en remet aux valeurs élevées de couleur des lacs du groupe 2 (figure V.2), qu'une contribution non négligeable des acides humiques soit à l'origine d'une partie de l'acidité des lacs de ce groupe.

6.2 NOMOGRAMME DE CLASSIFICATION DES LACS

La majorité des modèles empiriques discutée dans la littérature repose sur l'hypothèse que seul l'acide sulfurique provenant des précipitations est responsable de l'acidité. Cette condition ne serait toutefois pas toujours réaliste, puisque l'acidité d'un lac peut avoir une origine naturelle. Par exemple, l'oxydation des sulfures métalliques peut également contribuer aux teneurs en acides forts, tandis que la présence d'acides organiques peut être partiellement responsable de l'acidité des eaux lacustres (Johnson, 1981).

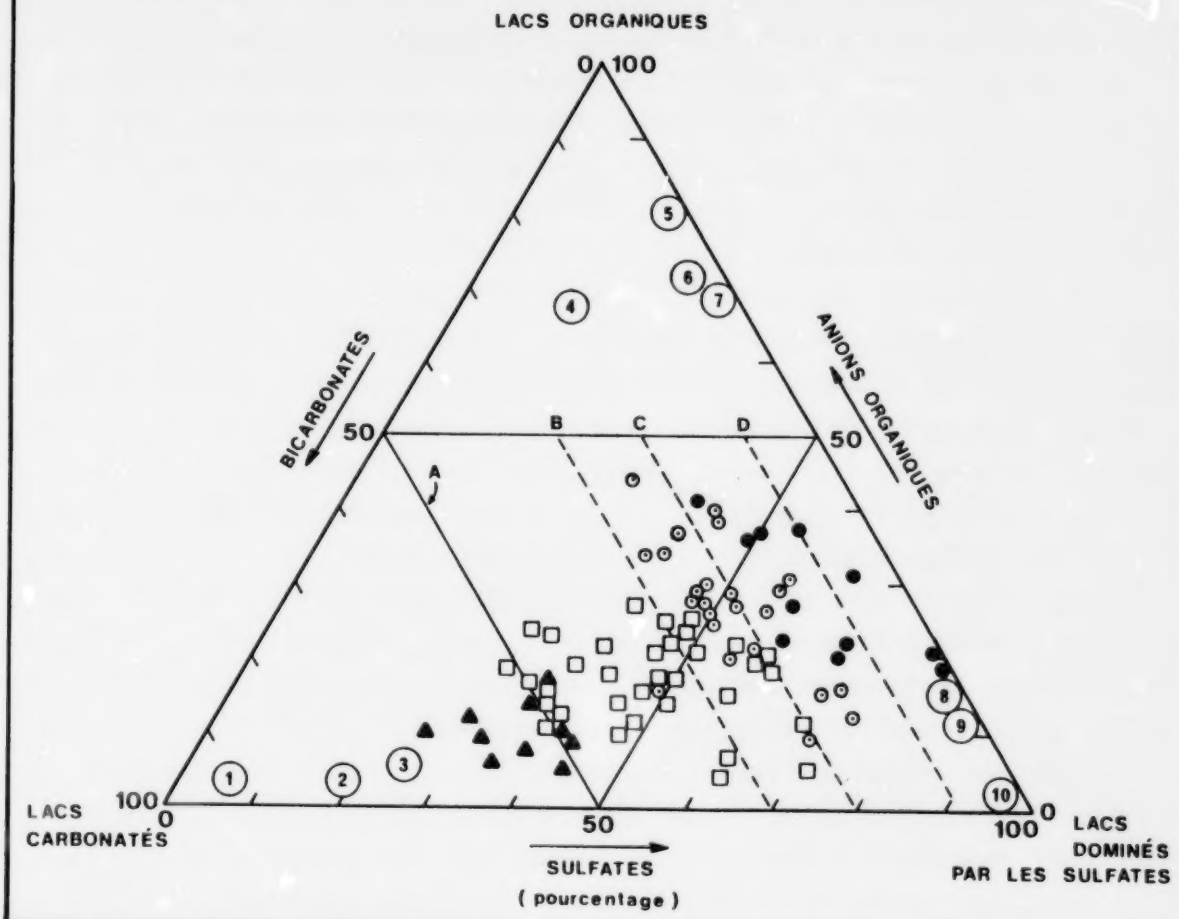
Cronan et al. (1978) ont tenté de déterminer l'origine de l'acidité des lacs en tenant compte de tous les intervenants majeurs. Ainsi, ils ont comparé l'importance relative de trois anions acides: les bicarbonates, les sulfates et les anions organiques qui proviennent respectivement de la dissociation de l'acide carbonique, de l'acide sulfurique et des acides organiques. Les sulfates et les bicarbonates ont été mesurés en laboratoire, tandis que les anions organiques sont identifiés au déficit anionique, lequel correspond à la différence entre la somme des cations (Ca^{++}, Mg^{++}, Na^{+}, K^{+}, H^{+}, NH_4^{+}, Al^{+++}, Fe^{++}, Mn^{++}) et la somme des anions (HCO_3^{-}, SO_4^{--}, NO_3^{-} et Cl^{-}). Dans le cas des anions organiques, Cronan et al. (1978) ont utilisé une méthode décrite par Armstrong et al. (1966), pour vérifier la nature organique du déficit anionique. Cette méthode est basée sur la comparaison de changements de pH suivant une période d'irradiation au rayonnement ultra-violet où l'écart entre les pH est où à l'oxydation des anions organiques. Toutefois il faut

noter que dans l'approche de Cronan et al. (1978), les nitrates et les chlorures sont considérés négligeables. De plus, l'erreur associée au déficit anionique (teneur en anions organiques) est le résultat de l'addition des erreurs spécifiques de chacun des types d'ions.

Selon Cronan et al. (1978), la dominance de l'anion sulfate indiquerait que l'acide sulfurique serait la source principale d'ions H+ et l'agent dominant d'altération chimique des minéraux dans les régions affectées par les précipitations acides. Par contre, les anions bicarbonates et organiques domineraient les processus d'altération chimique dans les régions peu polluées.

La figure VI.2 présente la distribution des lacs de la région de l'Outaouais selon le nomogramme de classification. Sur ce graphe, les teneurs relatives des anions sont exprimées en pourcentage de la somme des concentrations de HCO_3^-, de SO_4^{--} et d'anions organiques. Les teneurs relatives diminuent graduellement à partir de l'apex associé à chacune des espèces anioniques. Afin de mettre en évidence la dominance des anions, nous avons tracé un triangle correspondant à des teneurs relatives de 50 pour cent. Ce triangle permet de définir quatre secteurs: les lacs dominés par les sulfates, les lacs dominés par les bicarbonates, les lacs dominés par les anions organiques et une zone neutre où aucun anion ne présente de fraction supérieure à 50 pour cent.

Par ailleurs, quatre droites qualitatives définies à partir de 265 lacs des régions de Noranda, de l'Outaouais, de la réserve faunique La Vérendrye et de Portneuf (Dupont, 1984a, 1984b, 1985) ont été superposées au nomogramme de classification. Ces droites représentent des seuils de même pH corrigé pour le pCO_2 et de même écart entre le pH corrigé pour le pCO_2 et le pH calculé à partir de la somme des cations majeurs. Ainsi sur la figure VI.2, les droites A, C et D traduisent respectivement des pH de 6,5, 6,0 et 5,5. De la même façon, les droites B, C et D représentent respectivement des écarts de 0,5, 0,7 et 1,0 unité de pH. De telles droites suggèrent



ACIDITÉ RELATIVE ET VULNÉRABILITÉ DES LACS À L'ACIDIFICATION[1]

▲ : ACIDITÉ ET VULNÉRABILITÉ FAIBLES
□ : FAIBLE ACIDITÉ ET VULNÉRABILITÉ MOYENNE
⊙ : ACIDITÉ MOYENNE ET VULNÉRABILITÉ ÉLEVÉE
● : ACIDITÉ ET VULNÉRABILITÉ ÉLEVÉES

A : $pH^2 = 6,5$
B : ÉCART DE $pH^3 = 0,5$ UNITÉ
C : ÉCART DE $pH^3 = 0,7$ UNITÉ ; $pH^2 = 6,0$
D : ÉCART DE $pH^3 = 1,0$ UNITÉ ; $pH^2 = 5,5$

LACS SITUÉS AILLEURS AU QUÉBEC ET AUX ÉTATS-UNIS

(1) LACS ALCALINS, SCHEFFERVILLE
(2) LACS NEUTRES, SCHEFFERVILLE
(3) LAC ADELINE, ABITIBI
(4) LAC B9609, CHAPAIS
(5) TOURBIÈRE, MINNÉSOTA
(6) LAC FINDLEY, WASHINGTON
(7) LAC 82206, ABITIBI
(8) LYSIMÈTRES, MONT MOOSILAUKE, NEW HAMPSHIRE
(9) LAC B9550, SCHEFFERVILLE
(10) LACS SULFUREUX, SCHEFFERVILLE

1 : Selon la classification des lacs de la région de Noranda (Dupont 1984 a)
2 : pH corrigé pour le pCO_2 à partir du modèle de Kramer et Tessier (1982)
3 : Écart entre le pH corrigé pour le pCO_2 et le pH calculé à partir de la somme des cations majeurs

Figure VI.2 Présentation des 81 lacs de la région de l'Outaouais, selon un nomogramme de classification basé sur les concentrations relatives de bicarbonates, de sulfates et d'anions organiques.

que le pH diminue graduellement avec l'augmentation des teneurs relatives de sulfates et d'anions organiques. Il faut rappeler le caractère qualitatif de ces droites, puisque aucune assise théorique n'a encore été développée pour expliquer leur présence. Néanmoins, elles peuvent fournir un indice de l'acidité relative des lacs en présence de certains anions.

L'intérêt de l'utilisation d'une telle méthode de classification des lacs vient du fait qu'elle permet de comparer tous les types de lacs ou de données de qualité de l'eau selon une même mesure, soit la teneur relative en anions, ce que l'analyse multivariée ne peut faire. En fait, les résultats de ce dernier type d'analyse sont dépendants des lacs ou des stations utilisées. En d'autres termes, la classification des lacs d'une région sera difficilement comparable à celle d'une autre région, exception faite, si comme dans le cas des lacs de l'Outaouais et de Noranda, les lacs présentent des caractéristiques similaires. Ceci n'implique pas pour autant que l'analyse multivariée soit à déconseiller, puisque cette dernière permet de déterminer le comportement simultané de plusieurs variables actives ou inactives, ce que ne peut faire le nomogramme. Afin de mieux visualiser l'utilité des deux méthodes, nous avons décidé de positionner les 81 lacs de l'Outaouais sur le nomogramme en tenant compte des classes définies par l'analyse multivariée.

Selon le nomogramme de classification présenté à la figure VI.2, un grand nombre de lacs, dont la majorité des lacs acides de la région de l'Outaouais, sont dominés par les sulfates. De plus, deux de ces lacs voient leur teneur en bicarbonates réduite à zéro. Aucun des lacs de cette région ne se positionne dans le secteur des lacs organiques. Ce comportement suggère que l'acidité serait principalement due à l'action de l'acide sulfurique dans le bassin versant. Toutefois, ce modèle ne peut nous indiquer si ces sulfates proviennent d'apports anthropiques ou d'une production naturelle sur le bassin. Par ailleurs, une dizaine de lacs, principalement

associés au groupe des lacs peu vulnérables et peu acides, se situent dans le secteur des lacs carbonatés. Ces lacs alcalins sont tous situés dans le secteur de Papineau-Labelle où on observe la présence de roches carbonatées.

En faisant l'hypothèse que les droites décrites précédemment sont fiables, il semblerait que l'acidité augmente avec l'accroissement des teneurs relatives de sulfates. Par ailleurs, ces mêmes droites suggèrent qu'à une concentration relative fixe de sulfates, l'acidité augmente avec l'accroissement des teneurs relatives d'anions organiques. Un tel comportement a déjà été mentionné pour les lacs de Portneuf (Dupont, 1984b), ainsi que pour les lacs de l'Alaska (Johnson, 1981).

Fait à noter, les concentrations relatives d'anions organiques semblent augmenter avec la vulnérabilité et l'acidité des lacs. Ce comportement peut être attribuable à la constance des teneurs absolues d'anions organiques et à la baisse des teneurs absolues de bicarbonates avec l'accroissement de la vulnérabilité des lacs. Par exemple, un lac vulnérable et un lac alcalin possédant une même teneur en anions organiques présenteraient des proportions relatives différentes.

En comparaison aux lacs de la région de l'Outaouais, nous avons également représenté, sur le nomogramme, les résultats de quelques autres études. Les concentrations de bicarbonates, de sulfates et d'anions organiques associées à ces études sont présentées au tableau VI.1. Ainsi, les lacs alcalins et les lacs neutres de la région de Schefferville (Potvin et Grimard, 1983) se positionnent dans le secteur des lacs carbonatés. Ces lacs sont situés dans une région recevant peu d'apports atmosphériques acides (Talbot, 1982). Le lac Adeline situé dans la région de l'Abitibi (Dupont, 1984a) fait également partie du secteur des lacs carbonatés. Malgré sa teneur élevée en sulfates, ce lac possède un pH élevé (7,2) et une

TABLEAU VI.1 Comparaison des concentrations relatives de HCO_3^-, de SO_4^{--} et d'anions organiques de divers échantillons d'eau recueillis en Amérique du Nord.

SITES	pH	SOMME [1] DES CATIONS (µéq/l)	SOMME DES ANIONS (µéq/l)	HCO_3^- (µéq/l)	SO_4^{--} (µéq/l	DÉFICIT ANIONIQUE (µéq/l)	COULEUR VRAIE (hazen)
DOMINANCE DES BICARBONATES							
. Lacs alcalins, Sheffferville (Potvin et Grimard, 1983)	7,8 - 8,7	533	516	480	31	17	11,3
. Lacs neutres, Schefferville (Potvin et Grimard, 1983)	6,0 - 7,2	164	165	128	31	0	17,3
. Lac Adeline, Abitibi (Dupont, 1984a)	7,2	856	802	580	219	54	11,0
DOMINANCE DES ANIONS ORGANIQUES							
. Lac P-17, région de Chapais (Dupont, 1984a)	5,6	222	75	42	31	148	67,0
. Tourbière, Minnesota (Cronan et al., 1978)	3,6	509	116	0	96	393	-
. Findley Lake, Washington (Cronan et al., 1978)	4,4	210	80	9	49	130	-
. Lac P-57, Abitibi (Dupont 1984a)	4,3	315	95	0	83	220	120,0
DOMINANCE DES SULFATES							
. Moyenne des mesures de lysimètre au Mont Moosilauke, New-Hampshire (Cronan et al., 1978)	4,1	225	200	0	172	25	-
. Lacs sulfureux, Schefferville (Potvin et Grimard, 1983)							
- lac 255	4,5	577	501	0	499	76	2,5
- lac 234	3,3	1085[3]	1187	0	1185	0	1,0
- lac 235	3,8	627	626	0	624	1	1,0
- lac 239	3,9	1115[3]	1147	0	1145	0	1,0
- lac 240	3,6	893[3]	897	0	895	0	2,5
- lac 247	3,2	1677[3]	1728	0	1726	0	2,5
- lac 256	3,7	750[3]	750	0	748	0	2,5

1: Somme des cations = $H^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+ + NH_4^+ + Al^{3+} + Fe^{2+} + Mn^{2+}$
2: Somme des anions = $HCO_3^- + SO_4^{2-} + NO_3^- + Cl^-$
3: Déficience en cations due à la présence probable de métaux traces: Cr^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Pb^{2+}, Ni^{2+}

forte teneur de bicarbonates (580 µéq/l). Par ailleurs, le secteur des lacs organiques renferme trois lacs acides; le lac P-57 situé en Abitibi (Dupont, 1984a), une tourbière acide du Minnesota et le lac Findley localisé dans l'état de Washington (Cronan et al, 1978). Le lac P-17 situé près de Chapais (Dupont 1984a) est également un lac organique, mais l'acidité y est moins grande que dans les trois lacs précédents.

Parmi les exemples d'échantillons d'eaux dominés par les sulfates, on note la moyenne des mesures de lysimètre effectués sur dix sites du mont Moosilauke situé au New Hampshire (Cronan et al., 1978) où les apports acides sont particulièrement importants (Likens et Butler, 1981). Nous avons également présenté la position de sept lacs sulfureux acides de la région de Schefferville (Potvin et Grimard, 1983). Dans ces lacs, les sulfates proviendraient surtout de l'oxydation des sulfures métalliques contenus dans les roches du bassin versant. Les sulfates sont les seuls anions présents pour six des sept lacs, tandis qu'on observe une légère contribution relative de la part des anions organiques pour le lac 255. Cette contribution pourrait être liée au pourcentage supérieur de matière organique sur le bassin versant et à la présence de Sphagnum lindbergue[1]. Fait à noter, les sept lacs sulfureux sont caractérisés par de faibles valeurs de couleur vraie.

Sur le tableau VI.1, les lacs sulfureux présentent presque tous un déficit en cations. Ce déficit peut être attribué à la non-considération de métaux lourds, tels le cuivre, le zinc, le chrome, le plomb et le nickel, dans le calcul de la somme des cations. En fait, à des pH aussi faibles que 3,2, les teneurs de ces éléments peuvent être relativement élevées.

Selon la figure VI.2, il semble que l'acidification de lacs non organiques se traduirait par un déplacement de ces derniers selon un

---

1 Communication personnelle de Y. Grimard.

axe perpendiculaire aux droites empiriques décrites précédemment. L'acidification deviendrait complète lorsque l'alcalinité bicarbonate deviendrait nulle. Par ailleurs, lorsqu'on examine la position des lacs sulfureux acides de la région de Shefferville, on remarque une absence presque complète de couleur et d'anions organiques. Ceci laisse croire que l'acidification accrue d'un lac déjà acidifié pourrait entraîner la baisse des teneurs en anions organiques et de la couleur. Si un tel comportement était vérifié, cela signifierait une oligotrophisation du plan d'eau et un accroissement de la biodisponibilité des métaux lourds.

6.3 MODÈLE DE BROSSET

Lee et Brosset (1978) ont démontré que plusieurs lacs contenaient des concentrations variables d'acides faibles. Selon ces auteurs, ces acides s'apparenteraient surtout aux acides humiques. De plus, les acides humiques et organiques influenceraient nettement la concentration en ions hydrogène à des pH variant entre 3,0 et 8,0 (Brosset, 1979). Cette hypothèse est similaire à celle suggérée par Johnson (1981) pour les lacs du sud de l'Alaska.

Brosset (1979) a élaboré un modèle empirique basé sur la différence entre les concentrations de bases fortes et d'acides forts, les concentrations d'acide carbonique et d'ions H^+, ainsi que les constantes de dissociation de l'acide carbonique. Ce modèle peut également considérer plusieurs types d'acides faibles. D'autre part, pour des raisons de simplicité, Brosset (1979) fait l'hypothèse que les acides faibles sont monoprotoniques.

Dans le cas des lacs de la région de l'Outaouais, nous avons fait l'hypothèse que les acides humiques étaient les seuls autres acides faibles présents en dehors de l'acide carbonique.

Selon Lee et Brosset (1978), la constante de dissociation des acides humiques serait de $3,0 \times 10^{-4}$ pour des teneurs en acides faibles variant entre 10 et 100 µéq/l. Cette constante serait donc valable pour les lacs de l'Outaouais, puisque les teneurs d'acides faibles estimées pour ces lacs se situent toutes à l'intérieur de l'intervalle défini par Lee et Brosset (1979). Par ailleurs, nous avons fait l'hypothèse que la concentration en anions organiques définie à partir du déficit anionique (voir section 6.2) était équivalente à la concentration d'acides faibles organiques. Cette valeur a été utilisée par la suite dans l'équation de Brosset (1979):

$$[B_f]-[A_f] = \left[\left[\frac{K_a\,[AF]}{[H^+] + K_a}\right] + \left[\frac{K_{H_2CO_3}\,[H_2CO_3]}{[H^+]}\right] + \left[\frac{K_w}{[H^+]}\right] - [H^+]\right] \times 10^6 \qquad (6,4)$$

où $[AF]$ = concentration d'acides faibles (éq/l)
$[B_f]$ = concentration en bases fortes (µéq/l)
$[A_f]$ = concentration en acides forts (µéq/l)
K_a = constante de dissociation des acides humiques = $3,0 \times 10^{-4}$
$[H^+]$ = concentration en ions H^+ (éq/l)
$K_{H_2CO_3}$ = constante de dissociation de l'acide carbonique = $4,3 \times 10^{-7}$
$[H_2CO_3]$ = concentration d'acide carbonique non dissociée (éq/l)

Les teneurs en acide carbonique non dissociées n'ont toutefois pas été mesurées en laboratoire, mais ces concentrations ont pu être estimées à partir des concentrations de bicarbonates et d'ions H^+:

$$[H_2CO_3] = \frac{[H^+][HCO_3^-] \times 10^{-5}}{4,3} \qquad (6,5)$$

La figure VI.3 donne un exemple de l'application du modèle de Brosset (1979) où l'évolution générale du pH dans chacun des trois secteurs étudiés est présentée. Ce modèle permet de définir deux courbes d'évolution du pH. L'une des deux courbes seulement tient compte de l'influence des acides faibles. Par ailleurs, la plupart des

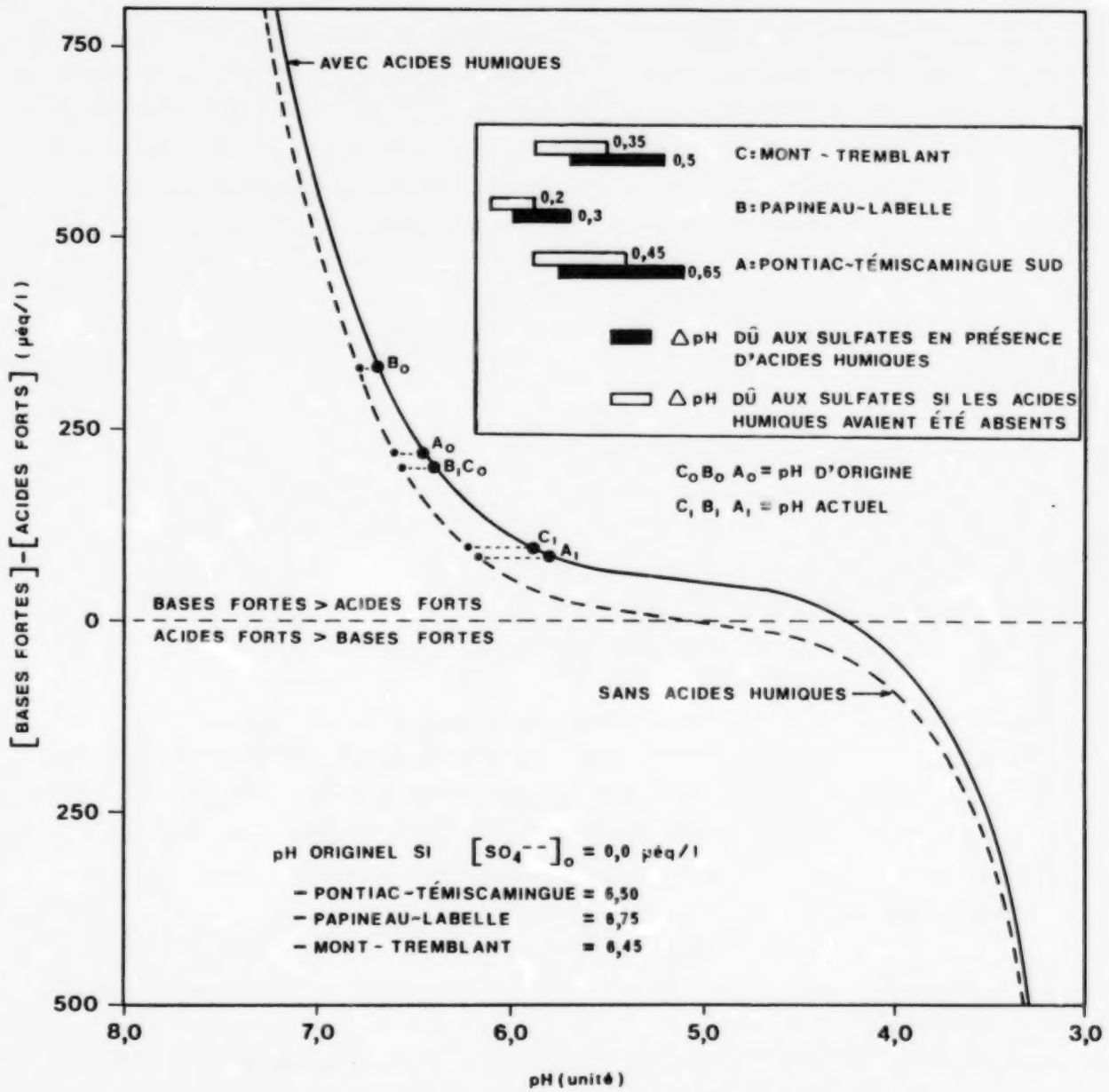


Figure VI.3 Application du modèle de Brosset (1979) aux lacs appartenant à la région de l'Outaouais.

lacs non affectés par les précipitations acides sont caractérisés par un excès de bases fortes qui permet de maintenir le pH à un niveau généralement supérieur à 6,0. L'ajout d'acides forts réduirait cet excès et ferait chuter le pH. Toutefois, le pH ne baisse pas de la même façon, selon qu'il y ait présence ou absence d'acides faibles. En fait, pour un ajout équivalent de sulfates (acide sulfurique), le pH diminue plus rapidement en présence d'acides humiques. De plus, l'écart de pH devient maximal à des pH variant entre 4,5 et 6,0 unités.

Le modèle de Brosset (1979) permet aussi d'estimer le pH précédant le début des apports acides. Ainsi, cette valeur peut être estimée en faisant l'hypothèse qu'aucun sulfate n'était présent dans le système avant le début des apports acides. Le pH obtenu de cette façon est probablement légèrement surestimé puisque la contribution naturelle en SO_4 pourrait être supérieure à zéro. Toutefois, nous n'avons aucune donnée sur cette contribution.

Les pH originels et actuels sont présentés sur la figure VI.3 et le tableau VI.2. Ainsi, les lacs des secteurs du Pontiac-Témiscamingue, de Papineau-Labelle et du parc du Mont-Tremblant (pH actuel moyen = 5,81, 6,47 et 5,90) auraient été caractérisés par des pH originels de 6,50, 6,75 et 6,45, ce qui se traduit par une acidification moyenne de 0,70, 0,28 et 0,55 unité de pH respectivement. Selon ce modèle, les lacs du secteur du Pontiac-Témiscamingue auraient subi la plus grande baisse de pH, suivis de près par les lacs du parc du Mont-Tremblant. Cette importante baisse de pH observée dans les lacs du Pontiac-Témiscamingue est probablement liée aux fortes teneurs en SO_4^{--} qui seraient elles-mêmes attribuables à la proximité des sources d'émission d'anhydride sulfureux. Fait à noter, sans la présence d'acides humiques, les lacs du secteur du Pontiac-Témiscamingue auraient eu un pH supérieur de 0,4 unité (6,2 au lieu de 5,81).

Un léger accroissement des apports de sulfates suffirait pour acidifier rapidement la majorité des lacs des secteurs du

TABLEAU VI.2: Détermination de l'influence des sulfates sur le niveau d'acidité des lacs associés aux groupements définis par la CAH et aux secteurs étudiés, selon le modèle de Brosset (1979).

	GROUPES DE LACS DÉFINIS PAR LA CAH (SECTION 5.2.1)							SECTEURS		
	1	2	3	4	5	6	7	PONTIAC-TÉMISCAMINGUE	PAPINEAU-LABELLE	MONT-TREMBLANT
pH actuel	5,49	5,90	6,24	5,77	6,25	6,43	6,59	5,81	6,47	5,90
pH d'origine [1] (en considérant les acides organiques)	6,25	6,25	6,70	6,30	6,70	6,70	6,80	6,50	6,75	6,45
ΔpH (entre le pH actuel et originel)	0,76	0,35	0,46	0,53	0,45	0,27	0,21	0,70	0,28	0,55
$[SO_4^{--}]$ requis pour atteindre les pH suivants (μéq/l):										
6,5	- [3]	-100	-70	-85	-50	-30	+40	-150	-20	-135
6,0	-80 [2]	-20	+40	-35	+40	+90	+150	-25	+100	-10
5,5	-10	+65	+80	+25	+70	+140	+190	+15	+140	+30
5,0	+35	+100	+105	+60	+90	+160	+200	+35	+160	+50
4,5	+70	+130	+130	+90	+105	+185	+220	+55	+180	+70

1. En faisant l'hypothèse qu'à l'origine, les sulfates = zéro.
2. Un chiffre négatif indique une diminution des teneurs actuelles de SO_4^{--}, tandis qu'un nombre positif indique une addition de sulfates à la teneur actuelle.
3. pH impossible à atteindre.

du Pontiac-Témiscamingue et du parc du Mont-Tremblant. Ainsi, selon le modèle de Brosset (1979), le pH de la plupart des lacs du secteur du Pontiac-Témiscamingue pourrait descendre sous le seuil de 5,0 unités avec une augmentation moyenne de 35 µéq/l des concentrations de SO_4 dans les lacs. Les lacs du secteur du mont Tremblant sont légèrement moins affectés. Dans leur cas, une augmentation moyenne de 50 µéq/l serait nécessaire pour parvenir au même résultat. Par ailleurs, la majorité des lacs du secteur de Papineau-Labelle serait peu vulnérable à une acidification rapide, puisque les teneurs de sulfates devraient doubler afin d'abaisser le pH à une valeur de 5,0.

Le modèle de Brosset (1979) a également été appliqué sur chacun des groupements de lacs définis par l'analyse multivariée (section 5.2.1). La synthèse des résultats est présentée à la figure VI.4 tandis que les pH actuels et d'origine sont affichés au tableau VI.2. Selon ce tableau, le pH originel des lacs associés aux groupes 1,2 et 4 aurait varié entre 6,25 et 6,30, tandis que le pH originel des autres lacs se serait situé entre 6,70 et 6,80. Les lacs du groupe 1 auraient toutefois subi la plus forte baisse de pH, soit 0,76 unité. Les lacs du groupe 4 suivent avec une baisse de 0,53 unité, tandis que les autres lacs auraient subi des baisses de pH variant entre 0,46 et 0,21 unité.

La figure VI.4 permet de simuler l'effet global de l'augmentation ou de la diminution des teneurs de sulfates sur le pH des lacs. Ainsi, une augmentation de 40 µéq/l dans les teneurs de sulfates pourrait faire passer le pourcentage de lacs à pH inférieur à 5,5 de 4 à près de 23 pour cent. De plus, une augmentation de 150 µéq/l dans les teneurs de sulfates pourrait abaisser le pH sous le seuil de 6,0 unités pour tous les lacs de la région. Par contre, une diminution de 35 µéq/l dans les teneurs de sulfates permettrait de faire passer de 37 à 15 pour cent, le nombre de lacs ayant un pH inférieur à 6,0. De plus, une baisse de 80 µéq/l dans les concentrations de sulfates, permettrait d'obtenir un pH supérieur à 6,0 pour tous les lacs de l'Outaouais.

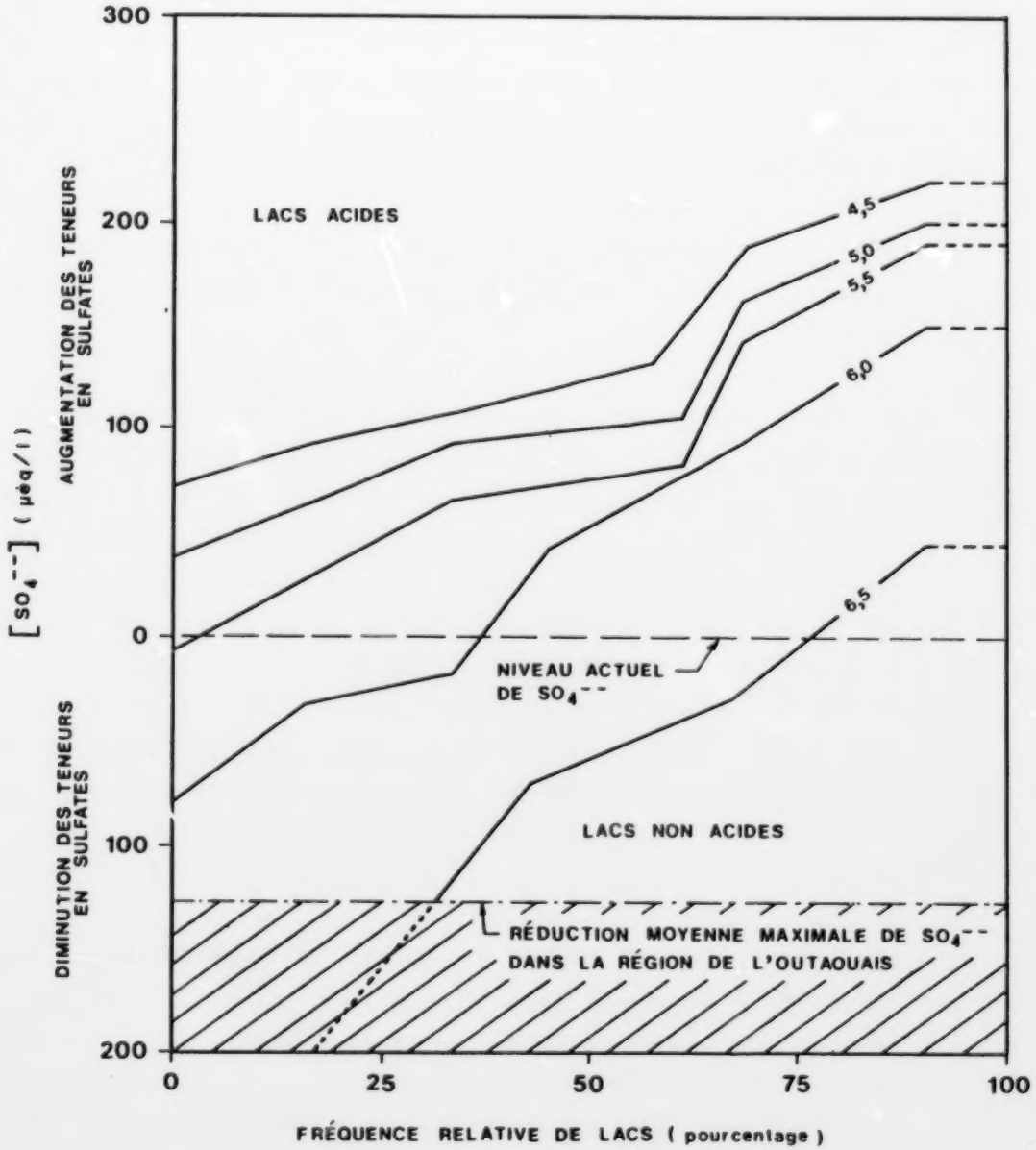


Figure VI.4 Estimation du nombre relatif de lacs dont le pH est inférieur ou égal à 4,5, 5,0, 5,5, 6,0 et 6,5, selon l'augmentation ou la diminution des teneurs de sulfates (d'après les résultats du modèle de Brosset, 1979).

CONCLUSION

Dans les sections précédentes, nous avons utilisé diverses méthodes statistiques et graphiques, ainsi que certains modèles empiriques pour caractériser l'état de la qualité des eaux dans les lacs de la région de l'Outaouais. L'utilisation de ces approches a permis de dégager certaines conclusions sur la variabilité spatiale des paramètres reliés à l'acidification des lacs:

- les teneurs en sulfates observées dans les lacs de la région de l'Outaouais sont supérieures à la moyenne des concentrations mesurées ailleurs au Québec, exception faite de la région de Rouyn-Noranda;

- parmi les trois secteurs composant la région étudiée, c'est le secteur du Pontiac-Témiscamingue qui présente les plus fortes teneurs en sulfates. C'est également ce secteur qui est situé le plus près des sources d'émission d'anhydride sulfureux localisées à Noranda, à Sudbury et aux États-Unis. À l'opposé, les lacs du parc du Mont-Tremblant présentent les plus faibles teneurs en SO_4, ainsi qu'un éloignement plus grand des sources mentionnées ci-haut;

- la teneur moyenne de sulfates décroît de l'ouest vers l'est. Un comportement similaire s'observe du sud au nord. L'analyse de corrélation a mis en évidence une relation inverse entre l'altitude et les concentrations de sulfates. Ainsi, plus l'altitude est élevée et plus la distance à l'Ontario et aux États-Unis est grande, moins les concentrations en sulfates sont élevées dans les lacs.

D'autre part, les méthodes statistiques et les modèles ont permis de tirer certaines conclusions sur l'importance des processus d'acidification:

- l'analyse multivariée appliquée aux données provenant de l'échantillonnage des lacs de la région de l'Outaouais a permis de définir des groupes distincts de lacs. Ainsi selon cette méthode, 27 pour cent des lacs de l'Outaouais sont acides et plus de 60 pour cent de ces derniers auraient été acidifiés par les apports atmosphériques acides. Quand aux autres lacs acides, l'acidité serait le résultat combiné d'une contribution naturelle des substances organiques et des apports atmosphériques. La région compte également 41 pour cent de lacs moyennement vulnérables ou moyennement acides, ainsi que 32 pour cent de lacs peu acides. Un peu plus du tiers de ces lacs peu acides sont très peu vulnérables à l'acidification;

- la comparaison des lacs de la région de l'Outaouais avec la classification des lacs de Noranda montre que 14 pour cent des lacs de l'Outaouais correspondraient aux lacs fortement acides et grandement affectés par les apports acides. De plus, 74 pour cent des lacs de l'Outaouais présenteraient des conditions d'acidité et de vulnérabilité intermédiaires, tandis que douze pour cent des lacs de l'Outaouais seraient peu acides, ce qui concorde avec les résultats du paragraphe précédent;

- selon le modèle de Brosset (1979) et le nomogramme de classification, l'acidité des lacs serait due principalement à l'action de l'acide sulfurique. L'acidité naturelle due aux acides organiques ne serait que d'une importance secondaire. Il est toutefois probable que la présence des acides organiques accélère la baisse de pH causée par l'action des acides forts;

- le nomogramme de classification met également en évidence la dominance nette des sulfates dans plus de 43 pour cent des lacs de l'Outaouais, ce qui est un indice du haut niveau d'agression par les apports acides. Par ailleurs, douze pour cent des lacs

de cette région demeurent encore dominés par les bicarbonates. Ce sont les même douze pour cent de lacs alcalins et peu acides qui ont été mis en évidence par l'analyse multivariée. Pour terminer, aucun lac à dominance organique n'est observé, ce qui suggère qu'aucun des lacs étudiés n'était naturellement acide à l'origine;

- l'analyse de corrélation a fait ressortir une forte relation entre le pH et le rapport bicarbonate/sulfate ($r = 0,85$). Cette relation montre qu'un faible pH est généralement accompagné d'un faible rapport $[HCO_3^-]/[SO_4^{--}]$ et vice versa. La qualité du lien suggère que le rapport bicarbonate/sulfate est un indice d'acidification valable pour les lacs de la région de l'Outaouais;

- les modèles de Kramer et Tessier (1982) et de Brosset (1979) font tous deux ressortir que les lacs acides et les lacs moyennement acides, caractérisés par des teneurs élevées en SO_4 (groupes 1 et 4), auraient subi les plus fortes acidifications par les acides forts. Ainsi, par rapport à une eau libre d'acides forts, le modèle de Kramer et Tessier (1982) met en évidence une baisse de 0,7 à 1,3 unité de pH dans les lacs, tandis que le modèle de Brosset estime cette baisse à 0,55 à 0,76 unité.

Plusieurs conclusions ont été également mises en évidence sur l'aspect de la minéralisation des lacs:

- le pH est influencé indirectement par le niveau de minéralisation. Ainsi, par rapport à un lac dont le niveau de minéralisation est élevé, un lac moins minéralisé présente généralement un pH plus faible à des concentrations égales de sulfates ou d'anions organiques. La nature géologique de la roche en place serait la principale responsable de ce niveau de minéralisation

puisque l'analyse discriminante permet de classifier correctement 78 pour cent des lacs sur la base de caractéristiques physico-chimiques spécifiques associées à certains types de géologie;

- les lacs des secteurs du Pontiac-Témiscamingue et du parc du Mont-Tremblant présentent un niveau de minéralisation similaire, malgré une acidité plus élevée dans les lacs du premier secteur. Les lacs du secteur Papineau-Labelle se distinguent des autres par un niveau de minéralisation plus grand qui est attribuable à la présence de roches et de sédiments carbonatés sur les bassins versants;

- les sulfates proviendraient en grande partie des précipitations, mais les roches calcaires observées sur le bassin versant des lacs peu acides du secteur de Papineau-Labelle contribueraient à produire des concentrations significatives de sulfates par l'intermédiaire de l'oxydation des sulfures de fer que ces roches contiennent;

- l'analyse multivariée a mis en évidence que les roches du bassin versant des lacs acides étaient identifiées en grande partie aux granites et aux gneiss renfermant une forte proportion de minéraux ferro-magnésiens. D'autre part, les roches du bassin versant des lacs peu acides sont identifiées au calcaire cristallin.

Finalement, diverses remarques sur les aspects organiques terminent notre étude:

- la couleur et les autres paramètres indicateurs de la présence de matière organique dans les eaux lacustres présentent une distribution homogène dans les trois secteurs étudiés;

- la couleur vraie est particulièrement plus faible dans plusieurs lacs alcalins du secteur de Papineau-Labelle et dans plusieurs lacs acides des deux autres secteurs étudiés.

RECOMMANDATIONS

L'analyse des données physico-chimiques des lacs de la région de l'Outaouais a mis en évidence la complexité des processus d'acidification. Ainsi, le phénomène de l'acidification ne dépend pas uniquement de la quantité de sulfates et d'ions H^+ reçue dans un lac. En fait, les processus d'acidification sont également dépendants de facteurs telles la géologie, la nature des dépôts superficiels et les substances organiques. Ces facteurs traduisent la sensibilité réelle d'un bassin versant. Il est dès lors important d'aborder la question de l'impact des précipitations acides dans son ensemble et non plus de se pencher uniquement sur le résultat final que représente la qualité de l'eau du lac. En d'autres termes, les études futures devraient tenir compte de chaque élément du système, les facteurs climatiques, les facteurs abiotiques et biotiques, ainsi que les facteurs morphométriques.

La réalisation d'un tel objectif nécessite toutefois la réponse à certaines questions. Par exemple, il devient impérieux d'estimer l'importance des contributions de sulfates provenant du milieu naturel, puisque la plupart des modèles empiriques demeurent relativement peu fiables lorsque l'on veut déterminer l'influence réelle des précipitations sur la qualité de l'eau. D'autre part, la détermination de la spéciation des métaux, tels l'aluminium, le manganèse et le fer, pourrait s'avérer importante au niveau de recherches portant sur la sensibilité des espèces biologiques à la charge acide. En fait, les métaux lourds complexés ou adsorbés à la matière organique ou à d'autres substances sont généralement moins toxiques que leurs formes labiles.

Les substances humiques devraient recevoir une attention particulière dans les études futures portant sur les phénomènes d'acidification. En fait, bien que les substances humiques puissent tamponner une eau à un pH variant entre 4,5 et 4,0, il est fort probable que leur présence accélère l'acidification des lacs lorsque le pH se situe entre 5,0 et 6,5.

L'échelle de l'étude peut s'avérer importante lorsqu'on analyse l'impact de phénomènes comme les précipitations acides. Par exemple, la nature géologique du bassin versant des lacs de la région de l'Outaouais est particulièrement complexe. La physico-chimie de ces lacs peut intégrer plusieurs types d'eau provenant de milieux de vulnérabilité différente. Dans un tel cas, l'étude à l'échelle d'un bassin versant pourrait masquer l'impact des précipitations acides sur des secteurs spécifiques de ce bassin. Ainsi, au niveau des études biologiques prenant place dans une région comme l'Outaouais, l'analyse au niveau du tributaire pourrait être préférable à l'analyse faite au niveau du lac. Tout d'abord, ces endroits sont d'importants sites de frai et peuvent de plus présenter des conditions de vie plus difficile qu'en lac, car l'impact de l'acidification pourrait s'y faire sentir plus fortement.

Finalement, certaines suggestions peuvent être apportées au niveau des méthodes d'analyses. Tout d'abord, il serait intéressant de raffiner le nomogramme de classification et de déterminer l'assise théorique d'un tel modèle. D'autre part, les informations acquises jusqu'à ce jour pourraient servir à localiser les lacs potentiellement acides ou acidifiés. Une vérification de ces lacs permettrait de déterminer si les populations biologiques ont été affectées par l'acidité ou l'acidification des eaux lacustres.

BIBLIOGRAPHIE

ALTSHULLER, A.P. and G.A. McBEAN. 1979. Le transport des polluants atmosphériques sur de grandes distances en Amérique du Nord: Un examen préliminaire, préparé par le Groupe consultatif de recherche États-Unis - Canada sur le transport des polluants atmosphériques sur de grandes distances, Environnement Canada, 46 pages.

ALTSHULLER, A.P. and G.A. McBEAN. 1980. Deuxième rapport du Groupe consultatif de recherche États-Unis-Canada sur le transport à grande distance de polluants atmosphériques, Environnement Canada, 39 pages.

ARMSTRONG, A.J., P.M. WILLIAMS and J.D.H. STRICKLAND. 1966. "Photo oxydation of organic matter in sea water by ultra violet radiation, analytical and other applications", dans Nature, 211: 481-484.

AVRAMTCHEV, L. et P. Marcoux. 1980. Carte géologique du Québec, ministère de l'Énergie et des Resources du Québec, rapport DP-0735, 1 carte.

BAKER, J. P. and C. L. SCHOFIELD. 1980. Aluminium toxicity to fish as related to acid precipitation and Adirondack surface water quality, DRABLOS D. et A. TOLLAN (eds.), Proc. of an International Conf. on Ecological Impact of Acid Precipitation, Sandefjord, Norway, 1980, March 11-14, pages 212-214.

BAKER, J.P. 1981. Aluminium toxicity to fish as related to acid precipitation and Adirondack surface water quality, Ph. D. Thesis, Cornell University, 461 pages.

BEAMISH, R. 1976. "Acidification of lakes in Canada by acid precipitation and the resulting effects on Fishes", dans Water, Air and Soil Pollution, 6: 501-514

BOBÉE, B., F. BORDELEAU, M. CANTIN, D. CLUIS, M. GOULET, M. LACHANCE, A. PARENT, L. POTVIN, L. RAYMOND et A. TESSIER. 1977a. Évaluation du réseau de la qualité des eaux: Analyse et interprétation des données de la période 1967-1975, vol. 1. , ministère des Richesses naturelles, Direction générale des eaux, Service de la qualité des eaux, Q.E.-20, 278 pages.

BOBÉE, B., P. BOUCHER, D. CLUIS, M. LACHANCE et A. TESSIER, 1977b. Méthodologie d'évaluation de la qualité de l'eau pour différents usages, rapport rédigé pour Environnement Canada, Rapport scientifique no. 89, INRS-Eau, 118 pages, 1 annexe, 1 appendice.

BOBÉE, B., M. LACHANCE et L. POTVIN, 1981. "Analyse multivariée et interprétation géochimique de la variabilité spatiale de la qualité de l'eau des rivières du Québec", dans Journal of Hydrology, 53: 95-116.

BOBÉE, B., Y. GRIMARD, M. LACHANCE et A. TESSIER. 1982. Nature et étendue de l'acidification des lacs du Québec, INRS-Eau, rapport scientifique no 140, 243 pages, 3 annexes.

BOBÉE, B., M. LACHANCE, J. HAEMMERLI, A. TESSIER, J.Y. CHARRETTE et J. KRAMER. 1983. Évaluation de la sensibilité à l'acidification des lacs du sud du Québec et incidences sur le réseau d'acquisition de données, rapport scientifique no 157 rédigé pour Environnement Canada, INRS-Eau, 198 pages, 4 annexes, 1 appendice.

BROSSET, C. 1979. "Factors influencing pH in lake water", dans Water, Air and Soil Pollution, 11: 57-61.

CHRISTMAN, R.F. and R.A. MINEAR. 1971. "Organics in lakes", in Organic Compounds in Aquatic Environments, Faust S.J. et J.V. Hunter (eds), pages 119-143.

CLAYTON, J.S., W.A. EHRLICH, D.B. CANN, J.H. DAY and I.B. MARSHALL. 1978. Soils of Canada, Research Branch, Department of Agriculture, 2 vol., 2 cartes.

CONROY, N. and W. KELLER. 1976. "Geological factors affecting biological activity in Precambrian shield lakes", dans Canadian Mineralogist, 14: 62-72.

CRONAN, C.S., W.A. REINERS, R.C. REYNOLDS Jr. and G.E. LANG. 1978. "Forest floor Leaching: Contributions from mineral, organic and carbonic acids in New-Hampshire Subalpine forests", dans Science, 200: 309-311.

CRONAN, C.S. and C.L. SCHOFIELD. 1979. "Aluminium leaching response to acid precipitation: Effects on high-elevation watersheds in the Northeast", dans Science, 204: 304-306.

DAWDY, D.R. and J. H. FETH. 1967. "Application of factors analysis in study of chemistry of groundwater quality, Mojave River Valley, California", dans Water Resources Research, 3(2): 505-510.

DICKSON, W. 1978. "Some effects of the acidification of Swedish lakes", Verh. Internat. Verein. Limnol., Stuttgart, October 1978, 20: 851-856.

DICKSON, W. 1980. Properties of acidified waters, DRABLOS, D. et A. TOLLAN (eds.), Proc. of an International Conf. on Ecological Impact of Acid Precipitation, Sandefjord, Norway, 1980, March 11-14, pages 75-83.

DRISCOLL, C.T. 1980. Chemical characterization of some dilute acidified lakes and streams in the Adirondack region of New-York state. Ph.D. Thesis, Cornell University, 307 pages.

DUESING, C.M. 1961. Rapport préliminaire sur la région de Lussier-Tellier, comtés de Joliette et de Montcalm, Ministère des Richesses naturelles, Service des levés géologiques, rapport préliminaire no. 482, 9 pages, 1 carte.

DUPONT, J. 1984a. Nature et étendue de l'acidification de 64 lacs de la région de Rouyn-Noranda, ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, Publication PA-9, Envirodoq no 840216, 127 pages, 6 annexes.

DUPONT, J. 1984b. Nature et étendue de l'acidification de 97 lacs de la région de Portneuf, ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, publication PA-10, Envirodoq no 840435, 113 pages, 6 annexes.

DUPONT, J. 1985. Étude de la physico-chimie de 22 lacs du parc de La Vérendrye en rapport avec les processus d'acidification des eaux lacustres, ministère de l'Environnement du Québec, Direction des relevés aquatiques, publication no PA-13, Envirodoq no 850323, 74 pages, 3 annexes.

FETH, J. H., C.E. ROBERSON and W. L. POLZER. 1964. Sources of mineral constituents in water from granitic rocks, Sierra Nevada, California and Nevada, Geological Survey Water Supply Paper 1535-I, U.S. Goverment printing office, Washington, 68 pages.

FRONTIER, S. 1976. "Étude de la décroissance des valeurs propres dans une analyse en composantes principales: comparaison avec le modèle du bâton brisé", dans J. exp. mar. Biol. Ecol., 25: 67-75.

GLASS, N. R., C.F. POWERS, J.J. LEE and D. L. RAMBO. 1980. A brief survey of the sensitivity of the environment to acid precipitation, preliminary draft of the Environmental Protection Agency, U.S.A., 35 pages.

GORHAM, E. 1961. "Factors influencing supply of major ions to inland waters, with special reference to the atmosphere", dans Geological Society of America Bulletin, 72: 795-840.

GRANDTNER, M.M. 1966. La végétation forestière du Québec méridionnal, Québec, Les Presses de l'université Laval, 216 pages.

GRIMARD, Y. 1981. Contribution à l'étude de la vulnérabilité des eaux lacustres québécoises face à l'acidification des précipitations, ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, rapport interne no 81-6, 38 pages.

GRIMARD, Y. 1982. Protocole d'échantillonnage des lacs du projet 10025: "Impact des précipitations acides", hiver 1982, ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, 10 pages.

HARVEY, H., R.C. PIERCE, P.J. DILLON, J.R. KRAMER and D.M. WHELPDALE. 1981. Acidification in the canadian aquatic environment - Scientific criteria for assessing the effects of acidic deposition on aquatic ecosystem, Publication NRCC no 18475, 369 pages.

HENRIKSEN, A. 1979. "A simple approach for identifying and measuring acidification of freswaters", dans Nature, 278: 542-545.

JAMBU, M. 1973. Techniques de classification appliquées à des données de sciences humaines, Thèse de 3e cycle, Université de Paris VI, Paris, 272 pages.

JEFFRIES, D.S., C.M. COX and P.J. DILLON. 1979. "Depression of pH in lakes and streams in Central Ontario during snowmelt", dans Journal of Fisheries Research Board of Canada, 36:6 640-646.

JOHNSON, D. W. 1981. "The natural acidity of some unpolluted waters in south-eastern Alaska and potential impacts of acid rain", dans Water, Air and Soil Pollution, 16: 243-252.

KATZ, M.B. 1976. Région de Portage-du-Fort et lac Saint-Patrice, ministère des Richesses naturelles du Québec, Direction générale des mines, Service de l'exploration géologique, rapport géologique no. 170, 122 pages, 1 carte.

KRAMER J.R. 1981. Calcite saturation index, alkalinity and alkalinity corrections to previous data, Environmental geochemical report, McMaster University, no 1981/1, 8 pages.

KRAMER, J.R. and A. TESSIER. 1982. "Acidification of aquatic systems: A critique of chemical approaches", dans Environmental Science and Technology, 16(11): 606-615.

LANGLOIS, C., A. LEMAY, J. OUZILLEAU et Y. VIGNEAULT. 1984. Qualité physico-chimique de 251 lacs du bouclier canadien (Québec), Ministère des Pêches et des Océans, Direction de la recherche sur les pêches, rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques no 1792, 63 pages.

LEBART, L. et J.P. FENELON. 1973. Statistique et informatique appliquées, seconde édition, DUNOD, Paris, 457 pages.

LEE, Y.H. and C. BROSSET 1978. "The slope of Gran's plot: A useful function in the examination of precipitation, the water-soluble part of airborne particles, and lake water", dans Water, Air and soil Pollution, 10: 457-469.

LEGENDRE, P. et L. LEGENDRE. 1979. Écologie numérique, 2: la structure des données numériques, Masson, Paris et les Presses de l'Université du Québec, tome 2, Collection d'Ecologie no 13, 274 pages.

LEGENDRE P., A. CHODOROWSKI, W. CHODOROWSKA, P. PICHET et P. POTVIN. 1980. Qualité des eaux: Interprétation des données lacustres (1971-1977), ministère de l'Environnement du Québec, Direction générale des inventaires et de la recherche, Service de la qualité des eaux, 409 pages.

LIKENS, G.E. and T. J. BUTLER. 1981. "Recent acidification of precipitation in North America", dans Atmospheric Environment, 15(7): 1103-1109.

MAGNAN, P. 1982. Étude de la sensibilité aux précipitations acides de 22 lacs du parc national de la Mauricie, Environnement Canada, Direction générale des eaux intérieures, région de Québec, 44 pages.

MILLER, J. P. 1961. Solutes in small streams draining single rock types, Sangre de Cristo Range, New-Mexico: Geochemistry of water, Geological Survey Water - Supply Paper 1535-F, 23 pages.

NERO, R.W. and D.W. SCHINDLER. 1983. "Decline of Mysis relicta during the acidification of lake 223", dans Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 40(11): 1905-1911.

NIE, N.H., C.H. HULL, J.G. JENKINS, K. STEINBRENNER and D. H. BENT. 1975. SPSS: Statistical package for the social sciences, seconde édition, McGraw-Hill Book Company, 675 pages.

ODEN, S. 1976. "The acidity problem, an outline of concepts", dans Water Air and Soil Pollution, 6: 137-166.

OUELLET, M. et H. G. JONES. 1982. "Évidence paléolimnologique de transport atmosphérique longue portée de polluants acidifiants et de métaux traces", dans Eau du Québec, 15(4): 356-366.

POLLOCK, D.W.T. 1956. Rapport préliminaire sur la région d'Addington-Labelle, comté de Papineau et de Labelle, ministère des Mines du Québec, Service de la carte géologique, rapport préliminaire No. 321, 5 pages, 1 carte.

POLLOCK, D.W.T. 1957. Rapport préliminaire sur la région de Preston-Gagnon, Districts électoraux de Papineau et de Labelle, ministère des Mines du Québec, Service de la carte géologique, rapport préliminaire no. 334, 6 pages, 1 carte.

POLLOCK, D.W.T. 1960. Rapport préliminaire sur la région de Rocheblave, Districts électoraux de Papineau et de Labelle, Ministère des Mines du Québec, Service de la carge géologique, rapport préliminaire no. 408, 8 pages, 1 carte.

POLLOCK, D.W.T. 1961. Rapport préliminaire sur la région de Lesage-Rivard, comté de Labelle, ministère des Richesses naturelles, Service de la carte géologique, rapport préliminaire no. 441, 12 pages, 2 cartes.

POTVIN, P. 1981. Réseau lacs: protocole général d'échantillonnage, ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, rapport 81-50, 19 pages.

POTVIN, P. et Y. GRIMARD. 1983. Étude de la qualité du milieu aquatique de 67 lacs à sauvagines de la région de Schefferville, Québec, ministère de l'Environnement, Direction générale des inventaires et de la recherche, Service de la qualité des eaux, publication PA-8, 108 pages, 3 annexes.

REUTER, J.H. and E.M. PERDUE. 1977. "Importance of heavy metal-organic matter interactions in natural waters", dans Geochemica et Cosmochemica Acta, 41: 325-334.

RICHARD, Y. 1982. Relation entre le niveau d'acidité de 158 lacs du parc des Laurentides et l'évolution de leurs statistiques de pêche au cours des neuf dernières années, ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, publication no PA-5, 115 pages.

RICHARD Y. 1985. Influence du niveau d'acidité des milieux lacustres sur la faune ichtyologique de la région de Portneuf, Québec, ministère de l'Environnement du Québec, Direction des relevés aquatiques, publication no. PA-15, Envirodoq no 850237, 197 pages, 10 annexes.

RIVE, M. 1970. Géologie de la région de Rowanton- Maganasipi Est, ministère des Richesses naturelles du Québec, Direction générale des mines, Service de l'exploration géologique, rapport préliminaire no. 586, 14 pages, 1 carte.

RIVE, M. 1973. Géologie de la région des lacs Beauchêne et Bleu, ministère des Richesses naturelles du Québec, Direction générale des Mines, Service de l'exploitation géologique, rapport préliminaire no. 580, 18 pages, 2 cartes.

RIVE, M. 1974. Géologie de la région du lac Dumoine, ministère des Richesses naturelles du Québec, Service de l'exploitation géologique, rapport préliminaire no. 604, 12 pages, 1 carte.

SCHEIDER, W.A., D.S. JEFFRIES and P.J. DILLON. 1979. "Effects of acidic precipitation on Precambrian freshwaters in southern Ontario", dans Journal of Great Lakes Research, 5(1): 45-51,

SCHOFIELD, C.L. 1976. "Acid precipitation: effects on fish", dans Ambio, 5(5-6): 228-230.

SHILTS, W. W., K.D. CARD, W.H. POOLE and B.V. SANDFORD. 1981. Sensibilité de la roche en place aux précipitations acides et modifications dues aux phénomènes glaciaires, Commission géologique du Canada, étude 81-14, 7 pages, 3 cartes.

SOCIÉTÉ D'AMÉNAGEMENT DE L'OUTAOUAIS, 1976. L'Outaouais, Société d'aménagement de l'Outaouais, Direction de l'expansion industrielle et commerciale, Hull, 16 feuillets.

TALBOT, L. et Y. GRIMARD. 1981. Effets des précipitations acides sur certaines zones du Québec: aspects physico-chimiques, ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, 11 pages.

TALBOT, L. 1982. Réseau de collecte de précipitations, évaluation de son fonctionnement et résultats préliminaires, ministère de l'Environnement du Québec, Service de la qualité des eaux, rapport 82-08, 19 pages.

THOMPSON, M.E. and F.C. ELDER. 1979. Sensitivity of the canadian aquatic regime to damage by long-range transport of air polluants, Environment Canada, National Water Research Institute, Burlington, Ontario, manuscript report, 16 pages.

WEBB, A.H. 1982. "Weak acid concentrations and river chemistry in the Tovdal river, Southern Norway", dans Water Research, 16: 641-648.

WRIGHT, R. F. and E.T. GJESSING. 1976. "Acid precipitation: Changes in the chemical composition of lakes", dans Ambio, 5(5-6): 219-223.

ANNEXE 1

CARACTÉRISTIQUES GÉOLOGIQUES ET NIVEAU DE VULNÉRABILITÉ
DE 81 LACS DE LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS

- N.B.

1- Importance relative de l'espèce géologique sur le bassin versant

- • : faible
- ● : moyenne
- ⬤ : élevée

2- Indice de vulnérabilité des lacs à l'acidification

- 1 : très vulnérable
- 2 : moyennement vulnérable
- 3 : peu vulnérable

3- La série de Grenville comprend des quartzites impurs, des gneiss feldspathiques à surface d'altération rouillée (pyrite), des gneiss à hornblende, des gneiss à biotite, des gneiss à hornblende et à biotite et du calcaire cristallin.

Secteur Pontiac Témiscamingue sud (1)

No	Nom du lac	No. du lac	pH	1					2									3	Indice de vulnérabilité des lacs
				Roches peu altérables					Roches moyennement altérables									Roches très altérables	
				Gneiss à biotite	Gneiss à hornblende	Gneiss grenatifère	Syénite	Granite	Gneiss mixte	Gneiss quartzo-feldspathique	Paragneiss	Gabbro	Métagabbro	Diorite	Granodiorite	Amphibolite	Migmatite	Série de Grenville (Marbre)	
1	Doyon	6277	6,4	●	•					●									1
2	Dragon	7032	6,0	●						•									2
3	Dufoe	6280	6,1	•		●													2
4	Dumont	6321	5,8			●											•		1
5	Farell	6289	5,8	●															1
6	Ferris	958	6,3							•							●		1
7	Flat	6327	5,6			•											●		2
8	Gillepsie	6249	6,5	●						•									1-2
9	Hanwell	7078	6,1	●													•		1
10	Hordaan	7097	5,9	●						●	•								1-2
11	Hyacinthe	7062	5,9	●						●									1-2
12	La Truite	6311	5,3	●	•					•			•				●		1
13	Vernède	7101	6,2	●						●									1-2
14	Neville	6259	6,2	●						•							●		1
15	Pinguet	7071	5,4		●														1
16	Salampar	7076	5,6	●						●									1-2
17	Sauvole	7065	6,1	●													•		1
18	Stubbs	7080	5,4	●															

Secteur Pontiac Témiscamingue sud (2)

No	Nom du lac	No. du lac	pH	1					2								3	Indice de vulnérabilité des lacs
				Roches peu altérables					Roches moyennement altérables								Roches très altérables	
				Gneiss à biotite	Gneiss à Horn-blende	Gneiss Grena-tifère	Syénite	Granite	Gneiss mixte	Gneiss quartzo-feld-spathique	Para-gneiss	Gabbro	Méta-gabbro	Diorite	Grano diorite	Amphi-bolite	Migma-tite	Série de Grenville (Marbre)	
19	Timmons	7060	6,3	●					●	●									2
20	Welches	6288	6,2	•		●													1
21	-	1131	5,8	●					•	•									1
22	-	7094	5,8	●						●									1-2
23	-	7105	6,0	●						●									1-2
24	-	38694	5,3	●					●										1-2
25	-	38738	5,8	●						•									1
26	-	38765	6,4							●									2
27	-	38775	6,2							●									2
28	-	38812	6,0	●						●									1-2
29	-	38967	6,1							●							●		2
30	-	39016	6,5			•											●		2
31	-	39413	6,3	●						●									1-2
32	-	78825	5,3							●									2
33	-	82499	6,3	●						•									2
34	-	82791	6,1	●						•						•	●		1
35	-	83871	5,8	●	●												•		1
36	-	89727	6,0	●	•					●									2

Secteur Papineau-Labelle

No	Nom du lac	No. du lac	pH	1					2								3	Indice de vulnérabilité des lacs
				Roches peu altérables					Roches moyennement altérables								Roches très altérables	
				Gneiss à biotite	Gneiss à hornblende	Gneiss grenatifère	Syénite	Granite	Gneiss mixte	Gneiss quartzo-feldspathique	Paragneiss	Gabbro	Métagabbro	Diorite	Granodiorite	Amphibolite	Migmatite	Série de Grenville (Marbre)	
37	Bertrand	4652	6,2																
38	Binet	4458	6,3	•	●		●		●				●	●	●				2
39	-	4038	6,9						●									●	1-2
40	-	14165	6,5						●									●	3
41	-	4332	6,6									●						●	3
42	-	4003	6,8						●									●	3
43	Corbeau	4389	6,8				•							•				●	3
44	Du Rat Musqué	14054	6,5						●									●	3
45	Ethier	4340	6,9															●	3
46	Grégoire	19222	6,5									•						●	3
47	Gordon	4422	6,0				●							•				•	3
48	-	4011	6,2				●		●									•	3
49	Michaud	4604	6,6					•						●	●				3
50	Mitchell	4621	6,9															●	3
51	Murphy	4388	6,5				•					•		•				●	3
52	Robillard	4383	6,6				•											●	3
53	Trottier	4460	6,5		●														3

Secteur parc du Mont Tremblant

				1		2			3	
No	Nom du lac	No. du lac	pH	Roches peu altérables		Roches moyennement altérables			Roches très altérables	Indice de vulnérabilité des lacs
				Charnockite	Granite	Gneiss non différencié	Paragneiss	Gneiss charnockitique	Série de Grenville (marbre)	
54	Alverson	423	6,4			•		●		2
55	Bambi	5316	6,2			•		●		2
56	Bowdon	4795	6,6					●		2
57	Chavoy	4858	5,6		●	•	•			1
58	Coderre	4743	5,9			●		•		2
59	Crawfoot	4889	5,7		•	•		•		1-2
60	Daule	4873	6,7		•		●			2
61	De l'Acacia	5185	5,9			●		•		2
62	Douard	5239	5,8				●			2
63	Général White	4706	6,6			●		•		2
64	Du Nord	4860	6,0		●		•			1-2
65	Du Rocher Blanc	4798	6,3		•			●		2
66	En Pointe Flèche	4880	5,8		●	•		•		1
67	Grasmère	4949	6,5					●		2
68	Herman	4785	5,7					●		2
69	Jens	4803	6,0					●		2
70	Maraouaga	5176	6,2		•		●			2
71	Malcouronne	4680	6,5	•		●				2
72	Pétain	4825	6,5					●		2
73	Pivele	4731	6,5			•		●		2
74	Poisson	4777	4,9	●						1
75	Raemer	4923	5,9		●	•				1
76	Raimbault	5323	6,1			•		●		2
77	Ramdeur	20991	6,1					●		2
78	Richard	4836	7,0		●	•		•	●	3
79	Travecy	4934	6,3		•	•		●		2
80	Verneuil	5179	6,6			●				2
81	Vidal	4890	5,9		●	•		•		1-2
82	Willard	5168	6,2		•	●	●			2

ANNEXE 2

DESCRIPTION DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES
DE 81 LACS ÉCHANTILLONNÉS DANS
LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS

Annexe 2 Description des caractéristiques physiques de 81 lacs échantillonnés dans la région de l'Outaouais.

#	NOM DU LAC	NUMÉRO DU LAC	RÉGION HYDROGRAPHIQUE BASSIN SOUS-BASSIN	ZONE UTM	COORDONNÉES UTM		CARACTÉRISTIQUES MORPHOMÉTRIQUES DES LACS				
					EST	NORD	ALTITUDE (m)	PÉRIMÈTRE DU LAC (km)	LONGUEUR MAXIMALE DU LAC (km)	LARGEUR MAXIMALE DU LAC (km)	SUPERFICIE DU LAC (km^2)
1	Doyon	6277	04-16-0001	18	324000	5116250	256	4,1	1,4	0,6	0,54
2	Dragon	7032	04-22-0006	17	692550	5143850	332	4,3	1,9	0,6	0,49
3	Dufoe	6280	04-16-0003	18	318700	5115250	271	5,3	1,9	0,5	0,49
4	Dumont	6321	04-20-0002	18	269550	5135350	347	2,4	1,1	0,2	0,13
5	Farell	6289	04-49-0002	18	309550	5117650	332	4,1	1,3	0,8	0,44
6	Ferris	958	04-72-0001	18	287300	5124650	302	2,7	1,1	0,3	0,36
7	Flat	6327	04-20-0003	18	272300	5135500	344	2,4	1,1	0,3	0,18
8	Gillispie	6249	04-16-0004	18	330300	5116850	271	4,2	1,4	0,8	0,73
9	Hakwell	7078	04-51-0001	17	723050	5135350	375	5,5	1,9	0,5	0,56
10	Hurdman	7097	04-22-0007	17	693600	5141500	314	3,1	1,0	0,6	0,36
11	Hyacinthe	7062	04-23-0004	17	686300	5144900	314	4,3	1,9	0,3	0,26
12	La Truite	6311	04-50-0001	18	299900	5134900	360	6,4	2,3	1,0	1,34
13	Vernede	7101	04-21-0004	17	706600	5140300	293	-	-	-	0,25
14	Neville	6259	04-14-0010	18	341300	5113900	287	6,2	2,1	0,8	0,88
15	Pinguet	7071	04-20-0001	17	719200	5141800	424	2,6	1,0	0,5	0,34
16	Salampar	7076	04-20-0004	17	722450	5146550	405	3,5	1,4	0,3	0,28
17	Sauvole	7065	04-53-0001	17	712200	5132200	360	4,3	1,3	0,5	0,41
18	Stubbs	7080	04-31-0040	17	726500	5130500	360	4,5	1,8	0,3	0,36
19	Timmons	7060	04-22-0003	17	681700	5139550	329	3,2	1,2	0,3	0,34
20	Welches	6288	04-49-0001	18	306400	5116900	287	5,8	2,7	0,5	0,85
21	-	1131	04-22-0001	17	687850	5151900	329	4,6	1,5	0,8	0,73
22	Gladys	7094	04-21-0010	17	699050	5148250	332	3,0	1,0	0,6	0,39
23	Madil	7105	04-31-0041	17	711200	5132500	360	4,4	1,8	0,5	0,54
24	-	38694	04-22-0004	17	685850	5137100	347	3,6	1,3	0,3	0,23
25	-	38738	04-22-0002	17	689500	5150600	332	3,6	1,9	0,3	0,31
26	-	38765	04-23-0002	17	675400	5143900	226	2,8	1,0	0,3	0,26

Annexe 2 Description des caractéristiques physiques de 81 lacs échantillonnés dans la région de l'Outaouais. (suite)

#	NOM DU LAC	NUMÉRO DU LAC	RÉGION HYDROGRAPHIQUE BASSIN SOUS-BASSIN	ZONE UTM	COORDONNÉES UTM		CARACTÉRISTIQUES MORPHOMÉTRIQUES DES LACS				
					EST	NORD	ALTITUDE (m)	PÉRIMÈTRE DU LAC (km)	LONGUEUR MAXIMALE DU LAC (km)	LARGEUR MAXIMALE DU LAC (km)	SUPERFICIE DU LAC (km^2)
27	-	38775	04-23-0003	17	681100	5145450	332	2,4	0,8	0,2	0,13
28	-	38812	04-22-0005	17	690700	5142600	332	3,6	0,8	0,5	0,28
30	West	39016	04-52-0002	17	717050	5133250	317	2,7	1,3	0,2	0,23
31	Percival	39413	04-21-0008	17	706000	5136350	317	2,5	0,8	0,2	0,13
32	-	78825	04-19-0012	18	286100	5135550	363	-	1,3	0,3	0,35
33	-	82499	04-14-0011	18	304750	5138550	363	-	1,0	0,3	0,15
34	-	82791	04-19-0011	18	281500	5139300	287	-	1,3	0,3	0,15
35	-	83871	04-16-0002	18	333500	5122000	299	-	3,4	0,3	0,70
36	-	89727	04-14-0012	18	314300	5131600	332	-	1,9	0,3	0,35
37	Bertrand	4652	04-04-0020	18	477700	5125550	363	2,8	1,1	0,3	0,21
38	Binet	4458	04-06-0076	18	475100	5115900	363	3,8	1,3	0,5	0,36
39	-	4038	04-04-0027	18	486900	5096500	256	4,0	1,9	0,3	0,47
40	-	14165	04-05-0006	18	471200	5083300	344	4,2	1,4	0,6	0,39
41	-	4332	04-04-0030	18	505350	5099150	271	4,1	1,8	0,3	0,41
42	-	4003	04-04-0025	18	481250	5082500	256	4,2	1,6	0,6	0,62
43	Corbeau	4389	04-04-0024	18	484200	5106900	271	3,0	1,3	0,5	0,36
44	Du Rat Musqué	14054	04-04-0026	18	483550	5082350	314	4,9	2,1	0,3	0,26
45	Éthier	4340	04-04-0019	18	500900	5117200	287	3,2	1,3	0,3	0,26
46	Grégoire	19222	04-04-0029	18	502700	5109600	317	2,7	1,3	0,3	0,13
47	Gordon	4422	04-04-0028	18	493950	5103600	287	3,0	1,4	0,2	0,13
48	-	4011	04-05-0005	18	465850	5074750	378	3,7	1,6	0,3	0,16
49	Michaud	4604	04-04-0021	18	480950	5125400	332	3,4	1,6	0,2	0,21
50	Mitchell	4621	04-06-0075	18	467850	5130900	287	4,4	1,4	0,3	0,39
51	Murphy	4388	04-04-0023	18	488400	5111300	299	1,9	1,0	0,2	0,08
52	Robillard	4383	04-04-0022	18	489800	5112650	317	0,8	0,3	0,2	0,03
53	Trottier	4460	04-06-0077	18	470450	5118650	363	2,4	1,1	0,2	0,18

Annexe 2 Description des caractéristiques physiques de 81 lacs échantillonnés dans la région de l'Outaouais. (suite)

#	NOM DU LAC	NUMÉRO DU LAC	RÉGION HYDROGRAPHIQUE BASSIN SOUS-BASSIN	ZONE UTM	COORDONNÉES UTM		CARACTÉRISTIQUES MORPHOMÉTRIQUES DES LACS				
					EST	NORD	ALTITUDE (m)	PÉRIMÈTRE DU LAC (km)	LONGUEUR MAXIMALE DU LAC (km)	LARGEUR MAXIMALE DU LAC (km)	SUPERFICIE DU LAC (km^2)
54	Akerson	423	04-02-0058	18	518600	5159900	302	3,8	1,6	0,3	0,23
55	Bambi	5316	05-01-0117	18	546550	5185650	500	4,3	1,9	0,5	0,62
56	Bowden	4795	04-02-0061	18	546250	5145000	515	3,7	1,6	0,3	0,31
57	Chavoy	4858	04-02-0059	18	538300	5174700	561	2,7	1,1	0,5	0,31
58	Coderre	4743	05-22-0119	18	572650	5141750	515	3,1	1,3	0,3	0,16
59	Crawfoot	4889	04-02-0062	18	542900	5150850	454	4,5	1,8	0,6	0,47
60	Daule	4873	05-01-0122	18	542450	5165350	463	4,7	1,6	0,8	0,60
61	De l'Acacia	5185	04-02-0072	18	535450	5204000	454	5,6	1,6	0,3	0,23
62	Douard	5239	04-06-0078	18	510450	5182600	530	3,4	1,4	0,2	0,23
63	Du Général White	4706	04-02-0065	18	524100	5134550	378	3,8	1,8	0,3	0,34
64	Du Nord	4860	05-01-0123	18	540450	5169200	469	3,8	1,6	0,5	0,44
65	Du Rocher Blanc	4798	05-01-0118	18	553000	5146800	530	5,9	2,1	0,5	0,44
66	En Pointe de Flèche	4880	05-01-0124	18	550550	5160000	469	3,2	1,3	0,5	0,31
67	Grasmere	4949	04-02-0069	18	524250	5163850	485	4,6	2,1	0,3	0,39
68	Herman	4785	05-22-0120	18	550100	5142300	515	3,6	1,4	0,5	0,41
69	Jens	4803	05-01-0119	18	563350	5175750	530	3,2	1,3	0,5	0,31
70	Makaouaga	5176	04-02-0060	18	522900	5183700	408	7,1	2,4	0,5	0,78
71	Malcouronne	4680	04-02-0064	18	525450	5137050	378	4,4	1,8	0,3	0,28
72	Pétain	4825	05-01-0120	18	564000	5164750	454	3,3	1,3	0,5	0,36
73	Pivele	4731	05-22-0118	18	573250	5148950	454	4,1	1,6	0,6	0,54
74	Poisson	4777	04-01-0066	18	341050	5129700	515	3,1	1,3	0,5	0,49
75	Raemer	4923	04-02-0067	18	531150	5153650	424	3,1	1,1	0,5	0,39
76	Raimbault	5323	05-01-0126	18	540150	5179750	530	4,6	1,6	0,8	0,75
77	Ramdeur	20991	05-01-0125	18	557700	5177450	497	2,2	1,0	0,5	0,31
78	Richard	4836	05-01-0121	18	570500	5157750	439	4,3	1,9	0,3	0,47
79	Travecy	4934	04-02-0068	18	525500	5173000	424	3,1	1,4	0,2	0,13
80	Verneuil	5179	04-02-0071	18	537700	5189500	515	4,1	1,9	0,3	0,44
81	Vidal	4890	04-02-0063	18	543850	5152700	469	4,1	1,8	0,5	0,52
82	Willard	5168	04-02-0070	18	530550	5193600	439	4,2	1,8	0,5	0,54

ANNEXE 3

LISTE DES DONNÉES PHYSICO-CHIMIQUES DE
81 LACS DE LA RÉGION DE L'OUTAOUAIS

N.B.

1. NOLAC: Numéro de référence des lacs. Les noms de lac associés à ces numéros sont présentés à l'annexe 2.

2. -1,0: Code identifiant les données manquantes

3. < : Valeur inférieure au seuil de détection

4. Abréviations:
   - PHL : pH mesuré en laboratoire (unité)
   - SO4 : sulfates (mg/l SO_4)
   - ALC : alcalinité (mg/l $CaCO_3$)
   - CON : conductivité (µS/cm)
   - CA : calcium total (mg/l Ca)
   - MG : magnésium total (mg/l Mg)
   - NA : sodium total (mg/l Na)
   - K : potassium total (mg/l K)
   - COU : couleur vraie (hazen)
   - TAN : tannins + lignines (mg/l tan)
   - F : fluorures (mg/l F)
   - NOX : nitrates + nitrites (mg/l N)
   - NH4 : azote ammoniacal (mg/l N)
   - NKJT: azote kjeldahl (mg/l N)
   - PT : phosphore total (mg/l P)
   - TURB: turbidité (U.T.N.)
   - CL : chlorures (mg/l Cl)
   - CT : carbone total (mg/l C)
   - CI : carbone inorganique total (mg/l C)
   - MN : manganèse total (mg/l Mn)
   - FE : fer total (mg/l Fe)
   - AL : aluminium dissous (mg/l Al)

PHYSICO-CHIMIE DE 81 LACS DE LA REGION DE L'OUTAOUAIS

NOLAC	PHL	SO4	ALC	CON	CA	MG	NA	K
1.	6.4	8.5	5.0	36.5	3.5	0.9	0.8	0.5
2.	6.0	8.0	5.3	44.3	3.8	0.8	1.0	0.6
3.	6.1	7.5	3.8	32.8	3.2	0.8	0.7	0.5
4.	5.8	7.5	1.9	30.0	2.8	0.6	0.7	0.3
5.	5.8	7.5	1.5	27.0	2.5	0.6	0.5	0.4
6.	6.3	8.0	3.5	35.0	3.2	0.9	1.1	0.7
7.	5.6	7.5	2.4	32.3	3.0	0.8	0.8	0.6
8.	6.5	7.5	4.1	31.7	3.0	0.9	0.6	0.5
9.	6.1	7.0	2.1	26.8	2.5	0.6	0.7	0.3
10.	5.9	7.5	1.8	32.5	2.8	0.7	1.1	0.6
11.	5.9	6.0	8.5	43.0	3.9	0.9	1.2	0.6
12.	5.3	7.0	0.2	24.3	2.0	0.5	0.6	0.4
13.	6.2	7.5	5.2	37.2	3.4	0.9	1.1	0.7
14.	6.2	7.0	2.4	27.0	2.5	0.7	0.5	0.3
15.	5.4	4.5	1.2	21.5	1.6	0.5	0.7	0.7
16.	5.6	6.5	0.9	24.5	2.2	0.5	0.7	0.3
17.	6.1	5.5	2.7	26.5	2.7	0.7	0.6	0.3
18.	5.4	6.5	1.0	26.7	2.0	0.5	0.8	0.3
19.	6.3	8.0	2.9	33.2	3.0	0.8	1.0	0.5
20.	6.2	8.0	2.6	32.0	2.7	0.8	0.7	0.7
21.	5.8	8.0	1.7	29.5	2.3	0.6	1.0	0.5
22.	5.8	6.5	1.7	28.7	2.5	0.7	0.8	0.5
23.	6.0	6.0	2.3	26.4	2.5	0.6	0.8	0.4
24.	5.3	7.0	0.4	28.5	2.4	0.6	0.7	0.4
25.	5.8	7.5	2.7	33.0	2.5	0.7	1.1	0.6
26.	6.4	7.5	6.0	37.0	3.9	1.0	0.9	0.6
27.	6.2	6.5	3.0	30.5	2.8	0.8	0.8	0.6
28.	6.0	6.0	2.5	27.7	2.7	0.6	1.0	0.6
30.	6.5	7.5	5.6	36.3	3.4	1.0	1.3	0.5
31.	6.3	6.5	6.4	35.5	3.7	1.0	1.0	0.5
32.	5.3	5.5	0.6	27.2	2.1	0.5	0.6	0.3
33.	6.3	8.0	4.8	35.6	4.5	0.8	0.7	0.5
34.	6.1	6.5	3.7	33.3	3.2	0.8	0.9	0.5
35.	5.8	7.0	2.9	30.7	3.0	0.9	0.7	0.4
36.	6.0	8.0	3.0	31.5	3.4	0.9	0.7	0.5
37.	6.2	5.0	3.6	25.5	2.5	0.6	0.4	0.6
38.	6.3	5.5	4.1	30.0	3.1	0.7	0.6	0.4
39.	6.9	8.0	14.1	52.0	7.9	0.6	0.6	0.5
40.	6.5	6.5	3.8	31.3	3.4	0.7	0.7	0.6
41.	6.6	5.5	7.2	33.0	4.5	0.6	0.4	0.3
42.	6.8	9.0	11.0	50.0	6.3	1.2	0.6	0.6
43.	6.8	6.5	13.5	52.0	6.7	1.1	0.7	0.5
44.	6.5	8.0	10.9	48.3	7.2	0.7	0.8	0.4
45.	6.9	12.5	18.0	76.0	11.0	1.6	0.6	0.8
46.	6.5	5.5	8.4	36.0	4.9	0.7	0.7	1.5
47.	6.0	5.5	2.7	26.5	3.1	0.6	0.4	0.3

PHYSICO-CHIMIE DE 81 LACS DE LA REGION DE L'OUTAOUAIS

NOLAC	PHL	SO4	ALC	CON	CA	MG	NA	K
48.	6.2	5.5	4.6	31.0	3.8	0.8	0.5	0.3
49.	6.6	5.0	8.6	37.0	4.8	0.7	0.5	0.6
50.	6.9	5.5	14.9	52.0	6.6	1.0	0.9	0.6
51.	6.5	8.0	9.9	45.5	5.5	0.9	0.7	0.4
52.	6.6	6.0	5.6	32.5	3.4	0.8	0.6	0.4
53.	6.5	5.0	7.1	32.3	3.3	0.9	0.9	0.8
54.	6.4	7.0	4.8	36.0	4.5	0.8	0.6	0.5
55.	6.2	3.5	2.9	23.5	2.3	0.6	0.6	0.7
56.	6.6	5.0	4.6	27.5	2.6	0.7	0.8	0.5
57.	5.6	4.0	1.0	19.5	1.7	0.5	0.5	0.4
58.	5.9	4.5	1.9	24.0	2.4	0.6	0.6	0.4
59.	5.7	6.0	2.4	29.8	2.9	0.8	0.9	0.7
60.	6.7	4.5	7.7	32.5	4.3	0.7	0.7	0.4
61.	5.9	6.0	1.8	23.8	2.4	0.5	0.9	0.1
62.	5.8	5.0	2.1	25.5	3.1	0.5	0.5	0.1
63.	6.6	7.0	10.5	43.0	4.8	1.2	1.0	0.4
64.	6.0	-1.0	2.4	21.8	2.0	0.6	0.8	0.3
65.	6.3	5.0	2.5	24.3	2.5	0.6	0.6	0.3
66.	5.8	5.0	2.8	28.0	2.8	0.7	0.8	0.3
67.	6.5	5.5	7.4	34.0	3.7	1.1	0.4	0.3
68.	5.7	4.5	1.0	21.0	2.0	0.4	0.5	0.3
69.	6.0	4.0	3.1	25.5	2.3	0.6	0.8	0.7
70.	6.2	4.5	2.9	25.5	2.8	0.6	0.5	0.4
71.	6.5	7.0	8.6	40.8	4.6	1.1	0.7	0.5
72.	6.5	4.5	3.9	24.0	2.0	0.6	0.9	0.3
73.	6.5	5.0	5.0	29.5	3.0	0.9	0.7	0.5
74.	4.9	6.5	< 0.1	26.7	1.8	0.4	0.4	0.3
75.	5.9	4.0	1.9	21.5	2.1	0.4	0.6	0.3
76.	6.1	4.5	2.1	20.8	2.0	0.5	0.6	0.2
77.	6.1	5.5	4.2	27.8	2.5	0.6	0.8	0.5
78.	7.0	6.5	12.4	45.5	5.3	1.3	1.0	0.5
79.	6.3	4.5	5.2	27.7	3.2	0.6	0.5	0.5
80.	6.6	5.5	7.6	33.5	3.8	0.9	0.7	0.3
81.	5.9	6.5	3.5	35.5	2.7	0.9	1.1	0.6
82.	6.2	5.0	2.8	23.8	2.6	0.5	0.6	0.4

Ministère des Communications

PHYSICO-CHIMIE DE 81 LACS DE LA REGION DE L'OUTAOUAIS

NOLAC	COU	TAN	F	NOX	NH4	NKJT	PT	TURB
1.	8.0	0.4	0.04	0.08	0.02	0.12	< 0.007	0.2
2.	8.0	0.5	< 0.04	0.51	0.56	0.62	< 0.007	0.3
3.	24.0	0.9	0.04	0.05	0.04	0.21	< 0.007	0.5
4.	11.0	0.5	0.04	0.09	0.07	0.18	< 0.007	0.3
5.	12.0	0.5	0.05	0.07	0.04	0.17	< 0.007	0.4
6.	13.0	0.5	< 0.04	0.14	0.04	0.14	< 0.007	0.3
7.	31.0	1.2	< 0.04	0.24	0.10	0.31	< 0.007	0.5
8.	9.0	0.5	0.04	0.07	0.04	0.20	< 0.007	0.5
9.	5.0	0.3	< 0.04	0.05	0.06	0.15	< 0.007	0.2
10.	21.0	0.9	0.04	0.22	0.13	0.25	< 0.007	0.3
11.	36.0	1.2	0.06	0.18	0.32	0.42	< 0.007	0.8
12.	10.0	0.5	< 0.04	0.06	0.03	0.17	< 0.007	0.5
13.	19.0	0.7	0.04	0.17	0.06	0.16	< 0.007	0.5
14.	6.0	0.3	0.04	0.05	0.02	0.15	< 0.007	0.3
15.	15.0	0.6	0.04	0.07	0.08	0.23	< 0.007	0.4
16.	8.0	0.4	0.04	0.06	0.06	0.15	< 0.007	0.5
17.	9.0	0.4	< 0.04	0.08	0.03	0.15	< 0.007	0.3
18.	18.0	0.7	0.05	0.06	0.05	0.15	< 0.007	0.3
19.	5.0	0.3	0.06	0.10	0.06	0.14	< 0.007	0.2
20.	7.0	0.3	0.04	0.13	0.05	0.14	< 0.007	0.2
21.	19.0	0.7	0.07	0.14	0.12	0.25	< 0.007	0.4
22.	20.0	0.8	< 0.04	0.15	0.07	0.20	< 0.007	0.2
23.	13.0	0.5	0.04	0.06	0.05	0.17	< 0.007	0.3
24.	19.0	0.8	0.05	0.11	0.08	0.20	< 0.007	0.3
25.	15.0	0.7	0.05	0.16	0.23	0.38	< 0.007	0.4
26.	7.0	0.3	0.04	0.07	0.05	0.12	< 0.007	0.3
27.	8.0	0.4	< 0.04	0.07	0.08	0.16	< 0.007	0.2
28.	15.0	0.6	< 0.04	0.06	0.06	0.16	< 0.007	0.2
30.	10.0	0.5	< 0.04	0.08	0.03	0.12	< 0.007	0.2
31.	9.0	0.4	0.04	0.14	0.02	0.14	< 0.007	0.2
32.	11.0	0.7	< 0.04	0.33	0.36	0.46	0.023	0.3
33.	23.0	0.9	0.04	0.11	0.02	0.14	< 0.007	0.3
34.	13.0	0.6	< 0.04	0.08	0.13	0.25	< 0.007	0.4
35.	42.0	1.5	< 0.04	0.10	0.06	0.29	< 0.007	0.4
36.	23.0	0.6	< 0.04	0.10	0.02	0.16	< 0.007	0.3
37.	8.0	0.4	< 0.04	0.04	0.04	0.16	< 0.007	0.2
38.	9.0	0.3	< 0.04	0.09	0.06	0.14	< 0.007	0.2
39.	3.0	0.1	< 0.04	0.05	< 0.02	0.10	< 0.007	0.2
40.	26.0	0.9	0.04	0.12	< 0.02	0.20	0.007	0.4
41.	3.0	0.2	< 0.04	0.04	0.02	0.10	< 0.007	0.2
42.	6.0	0.3	< 0.04	0.11	< 0.02	0.06	< 0.007	0.2
43.	9.0	0.3	< 0.04	0.08	< 0.02	0.12	< 0.007	0.3
44.	26.0	0.8	< 0.04	0.17	< 0.02	0.21	0.007	0.3
45.	9.0	0.3	< 0.04	0.08	< 0.02	0.19	0.007	0.4
46.	11.0	0.4	0.04	0.22	0.02	0.18	< 0.007	0.4
47.	21.0	0.8	< 0.04	0.07	0.03	0.20	< 0.007	0.3

PHYSICO-CHIMIE DE 81 LACS DE LA REGION DE L'OUTAOUAIS

NOLAC	COU	TAN	F	NOX	NH4	NKJT	PT	TURB
48.	21.0	0.7	< 0.04	0.19	0.03	0.19	0.010	0.3
49.	17.0	0.6	< 0.04	0.09	0.05	0.20	< 0.007	0.3
50.	6.0	0.2	0.05	0.11	0.02	0.15	< 0.007	0.4
51.	15.0	0.5	< 0.04	0.08	0.03	0.17	< 0.007	0.4
52.	3.0	0.2	< 0.04	0.07	0.02	0.08	< 0.007	0.2
53.	10.0	0.4	0.04	0.08	0.02	0.15	< 0.007	0.2
54.	11.0	0.4	< 0.04	0.56	0.02	0.11	< 0.007	0.4
55.	31.0	0.9	< 0.04	0.12	0.02	0.12	0.010	0.4
56.	4.0	0.2	< 0.04	0.10	0.05	0.15	< 0.007	0.3
57.	11.0	0.5	0.04	0.08	0.02	0.12	< 0.007	0.4
58.	22.0	0.7	< 0.04	0.10	0.06	0.21	0.007	0.4
59.	31.0	0.9	< 0.04	0.11	0.02	0.19	< 0.007	0.5
60.	9.0	0.4	< 0.04	0.06	< 0.02	0.14	< 0.007	0.2
61.	12.0	0.4	< 0.04	0.06	0.03	0.13	< 0.007	0.4
62.	38.0	1.2	< 0.04	0.08	0.04	0.17	< 0.007	0.5
63.	7.0	0.3	< 0.04	0.10	< 0.02	0.08	< 0.007	0.2
64.	20.0	0.6	< 0.04	0.12	0.02	0.17	< 0.007	0.3
65.	9.0	0.4	< 0.04	0.07	0.02	0.12	0.010	0.3
66.	34.0	1.1	< 0.04	0.15	0.04	0.24	0.007	0.4
67.	6.0	0.2	< 0.04	0.12	< 0.02	0.10	< 0.007	0.2
68.	7.0	0.3	< 0.04	0.11	0.03	0.08	< 0.007	0.2
69.	25.0	0.8	< 0.04	0.16	0.02	0.19	0.027	0.3
70.	17.0	0.6	< 0.04	0.10	0.04	0.13	< 0.007	0.3
71.	8.0	0.3	< 0.04	0.14	< 0.02	0.11	< 0.007	0.2
72.	9.0	0.4	< 0.04	0.06	< 0.02	0.08	0.017	0.2
73.	7.0	0.3	< 0.04	0.06	0.02	0.13	< 0.007	0.2
74.	5.0	0.3	< 0.04	0.24	0.05	0.05	< 0.007	0.3
75.	10.0	0.4	< 0.04	0.34	0.06	0.16	< 0.007	0.4
76.	6.0	0.3	< 0.04	0.16	< 0.02	0.06	< 0.007	0.2
77.	27.0	0.8	< 0.04	0.18	0.03	0.15	0.007	0.5
78.	3.0	0.1	< 0.04	0.04	< 0.02	0.04	0.010	0.2
79.	10.0	0.4	< 0.04	0.10	0.04	0.14	0.007	0.3
80.	5.0	0.2	< 0.04	0.10	< 0.02	0.08	< 0.007	0.3
81.	47.0	1.5	< 0.04	0.37	0.07	0.32	0.007	0.7
82.	15.0	0.5	< 0.04	0.11	0.02	0.09	< 0.007	0.5

Ministère des Communications

PHYSICO-CHIMIE DE 81 LACS DE LA REGION DE L'OUTAOUAIS

NOLAC	CL	CT	CI	MN	FE	AL
1.	0.5	7.5	3.0	0.01	0.04	0.04
2.	0.3	8.0	3.5	0.05	0.21	0.07
3.	0.3	12.0	3.5	< 0.01	0.10	0.05
4.	0.3	7.0	1.5	< 0.01	0.03	0.06
5.	0.4	7.5	2.5	0.05	0.12	0.08
6.	0.3	7.0	2.0	< 0.01	0.04	0.07
7.	0.3	11.5	3.0	0.02	0.19	0.08
8.	0.5	9.0	2.5	0.01	0.03	< 0.02
9.	0.3	6.0	1.0	< 0.01	< 0.02	< 0.02
10.	0.3	9.5	2.0	0.02	0.14	0.11
11.	0.3	16.0	4.0	0.05	0.77	0.10
12.	0.3	8.5	2.0	0.06	0.06	0.07
13.	0.4	8.5	3.0	0.01	0.14	0.07
14.	0.4	7.0	3.0	< 0.01	0.04	< 0.02
15.	0.2	7.5	2.0	0.05	0.24	0.06
16.	0.2	6.0	1.0	0.04	0.10	0.06
17.	0.3	7.0	2.0	0.01	< 0.02	0.02
18.	0.4	7.5	1.5	0.04	0.15	0.13
19.	0.3	6.0	3.0	0.04	0.06	0.03
20.	0.3	6.0	1.5	< 0.01	0.04	0.02
21.	0.3	-1.0	2.0	0.05	0.21	0.11
22.	0.3	8.0	2.0	0.05	0.12	0.08
23.	0.3	7.5	2.0	0.01	0.06	0.03
24.	0.4	7.5	0.5	0.04	0.14	0.15
25.	0.3	9.5	3.0	0.05	0.05	0.08
26.	0.4	6.5	4.0	< 0.01	0.04	< 0.02
27.	0.2	8.0	3.0	0.08	0.08	0.03
28.	0.3	8.5	3.0	0.01	0.07	0.06
30.	0.3	7.0	2.0	< 0.01	< 0.02	< 0.02
31.	0.3	8.0	3.0	0.01	< 0.02	0.02
32.	0.2	8.0	0.5	0.04	0.09	0.07
33.	0.4	11.0	3.0	< 0.01	0.05	0.06
34.	0.3	9.0	3.0	0.03	0.06	0.06
35.	0.4	13.0	2.0	0.02	0.25	0.11
36.	0.4	9.0	2.5	0.02	0.04	0.04
37.	0.2	7.5	3.0	0.01	0.03	0.02
38.	0.3	7.0	3.0	< 0.01	0.12	0.03
39.	0.4	9.0	4.5	0.01	< 0.02	< 0.02
40.	0.3	16.0	2.5	0.12	0.07	0.06
41.	0.4	7.0	3.0	< 0.01	< 0.02	0.02
42.	0.4	10.0	4.0	0.01	< 0.02	< 0.02
43.	0.3	10.0	5.5	< 0.01	0.10	< 0.02
44.	0.4	12.5	4.0	0.02	0.07	0.06
45.	0.4	13.0	7.0	0.01	< 0.02	< 0.02
46.	0.4	10.0	3.5	< 0.01	0.05	0.04
47.	0.4	18.0	-1.0	0.03	0.11	0.08

Ministère des Communications

PHYSICO-CHIMIE DE 81 LACS DE LA REGION DE L'OUTAOUAIS

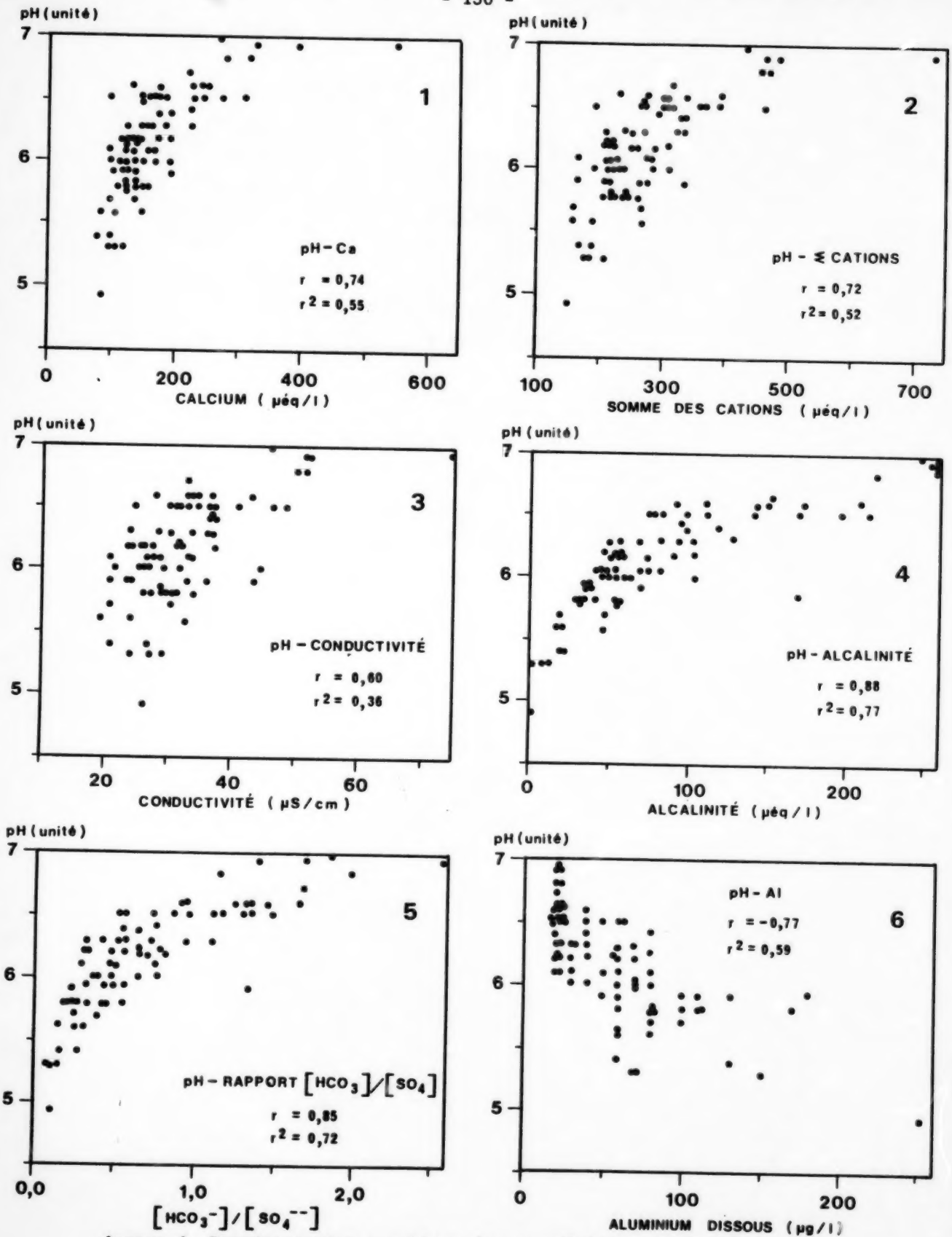
NOLAC	CL	CT	CI	MN	FE	AL
48.	0.4	9.5	3.5	0.01	0.18	0.08
49.	0.3	11.0	4.0	0.01	0.09	0.04
50.	0.3	11.5	5.5	0.01	< 0.02	< 0.02
51.	0.4	12.0	5.0	0.01	0.07	0.05
52.	0.4	7.5	4.0	0.02	< 0.02	< 0.02
53.	0.4	8.5	4.0	0.01	0.08	< 0.02
54.	0.3	9.0	2.5	0.02	0.06	0.08
55.	0.3	10.0	2.0	0.02	0.40	0.06
56.	0.4	5.5	2.0	0.01	0.06	< 0.02
57.	0.2	8.0	2.0	0.03	0.05	0.06
58.	0.4	8.5	1.5	0.06	0.34	0.13
59.	0.3	10.0	2.5	0.02	0.27	0.08
60.	0.3	8.0	3.5	< 0.01	0.02	< 0.02
61.	0.3	7.0	1.5	0.01	0.18	0.06
62.	0.3	11.0	1.5	0.05	0.33	0.17
63.	0.5	9.0	4.5	< 0.01	0.04	< 0.02
64.	0.3	7.5	2.0	0.01	0.21	0.07
65.	0.2	5.5	1.5	0.02	0.11	0.02
66.	0.2	11.5	2.5	0.01	0.20	0.10
67.	0.3	7.5	3.0	0.02	0.05	< 0.02
68.	0.7	5.0	1.0	0.04	0.06	0.10
69.	0.4	9.5	2.0	0.01	0.12	0.07
70.	0.2	7.5	2.5	0.02	0.10	0.06
71.	0.5	8.5	4.0	0.02	0.06	< 0.02
72.	0.2	7.5	1.5	< 0.01	0.07	< 0.02
73.	0.3	7.0	2.5	< 0.01	0.03	< 0.02
74.	0.3	4.0	1.0	0.09	0.10	0.25
75.	0.2	6.0	2.0	0.01	0.07	0.05
76.	0.2	6.0	1.0	0.02	0.02	0.03
77.	0.3	9.0	2.5	0.04	0.29	0.08
78.	0.4	7.0	4.0	< 0.01	0.02	< 0.02
79.	0.3	8.0	3.0	< 0.01	0.07	0.04
80.	0.2	7.5	3.0	0.01	0.09	< 0.02
81.	0.6	14.0	3.0	0.04	0.33	0.18
82.	0.2	7.5	1.5	0.03	0.18	0.04

Ministère des Communications

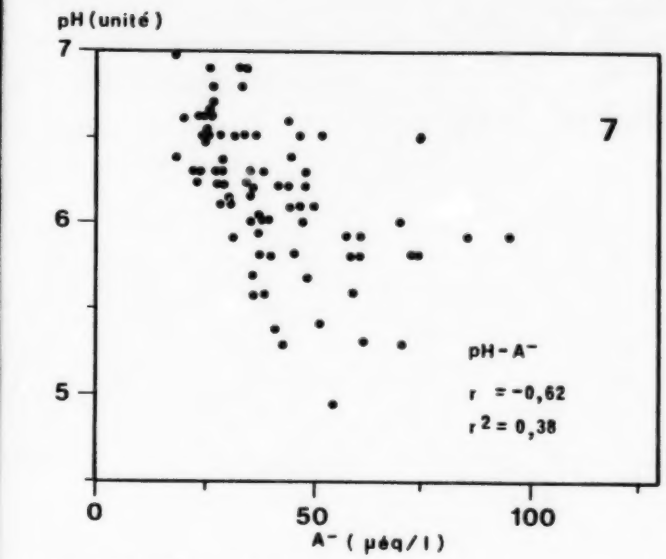
ANNEXE 4

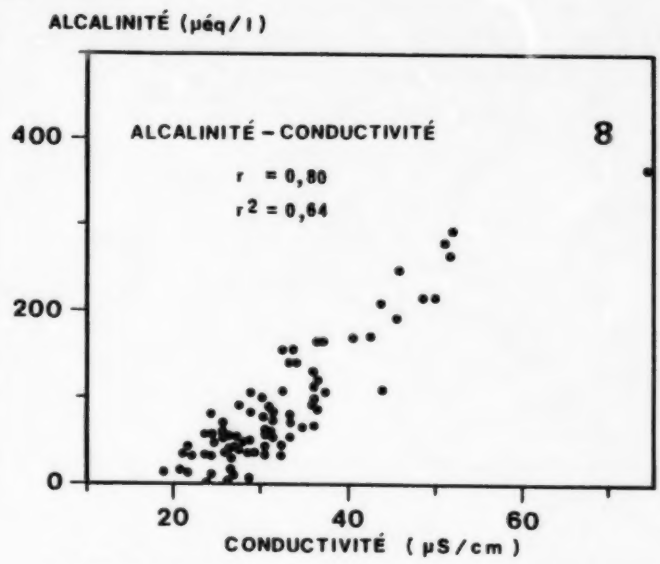
REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DES CORRÉLATIONS
DE SPEARMAN SUPÉRIEURES À 0,60

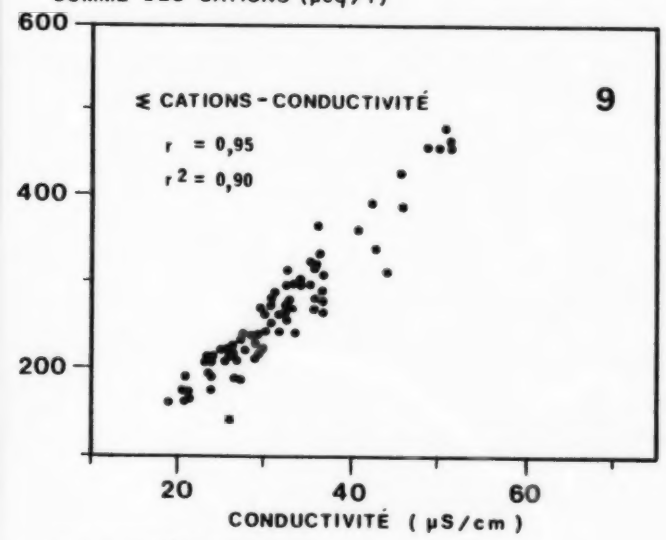
(rho de Spearman)

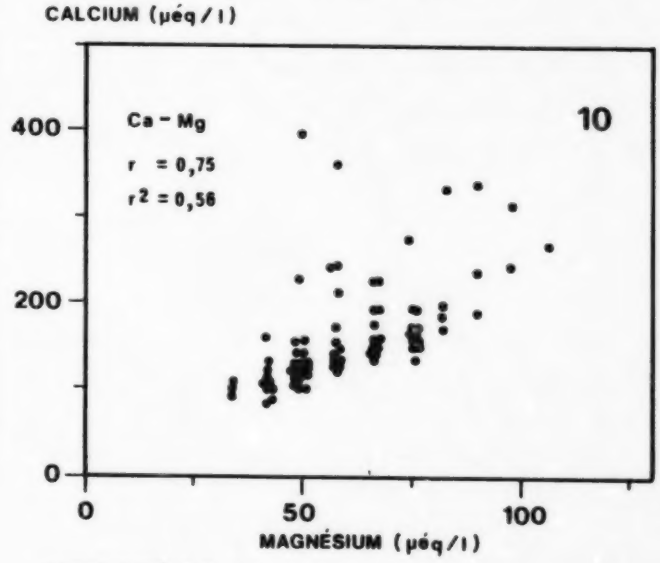


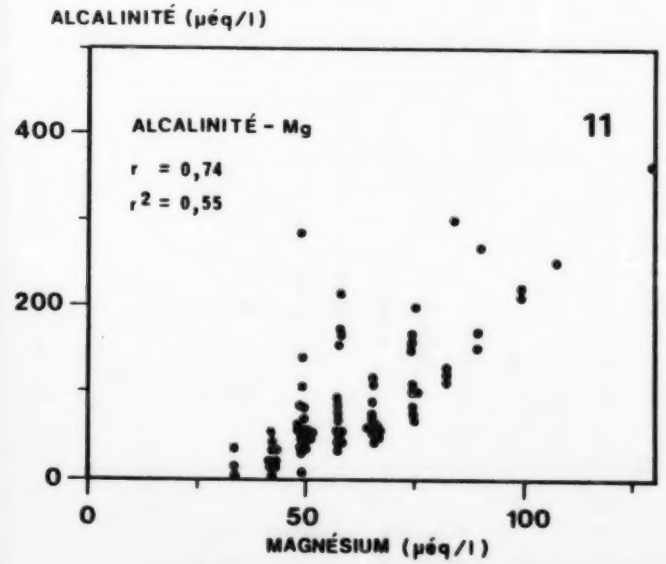
Annexe 4 Représentation graphique des corrélations de Spearman supérieures à r = 0,6.

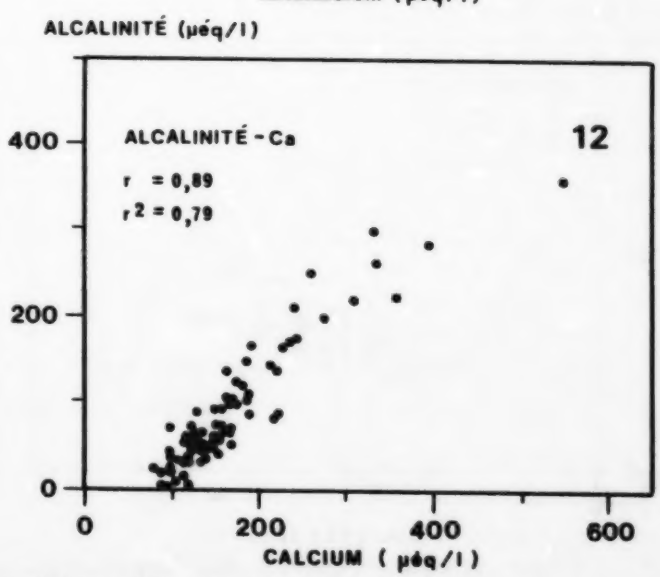




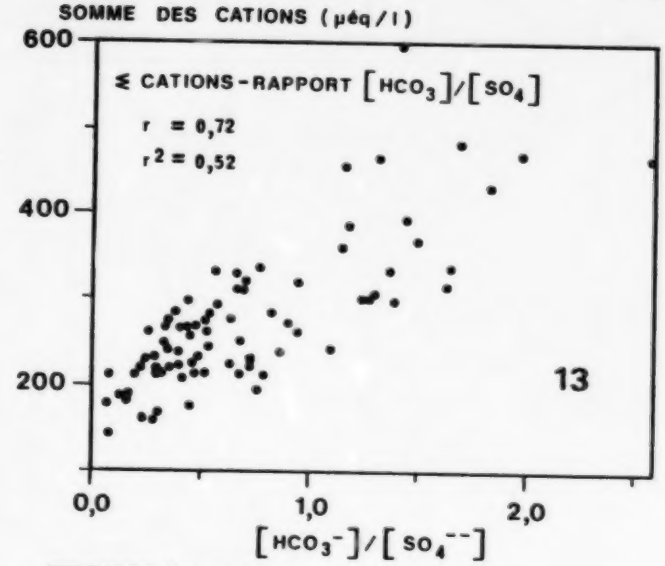


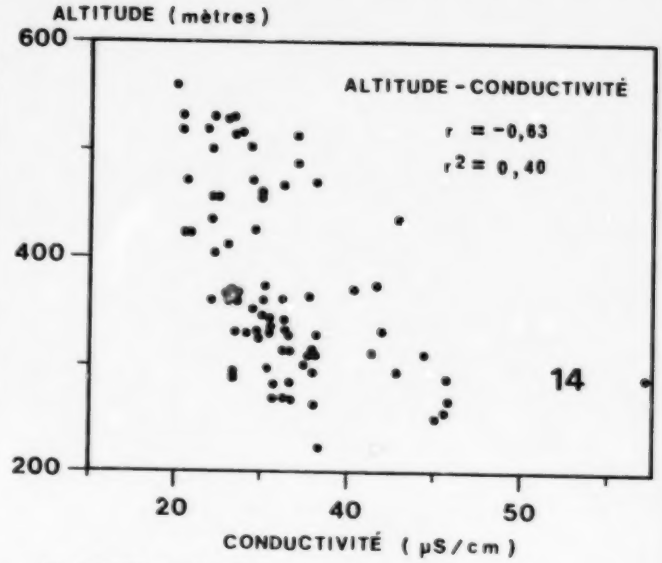


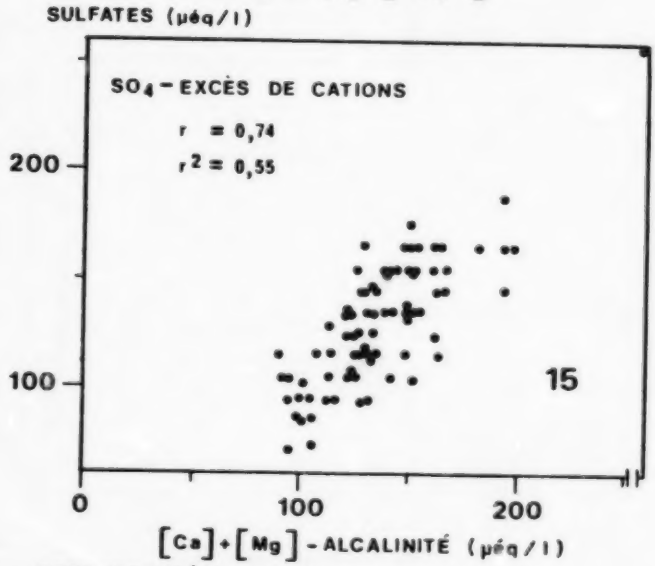


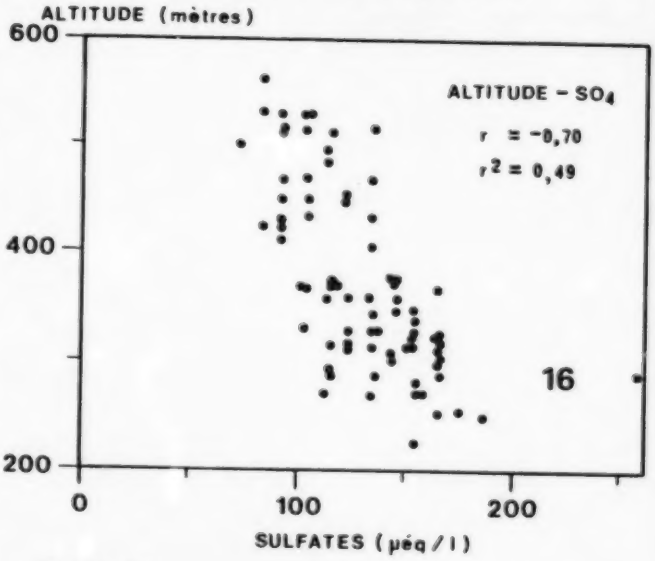


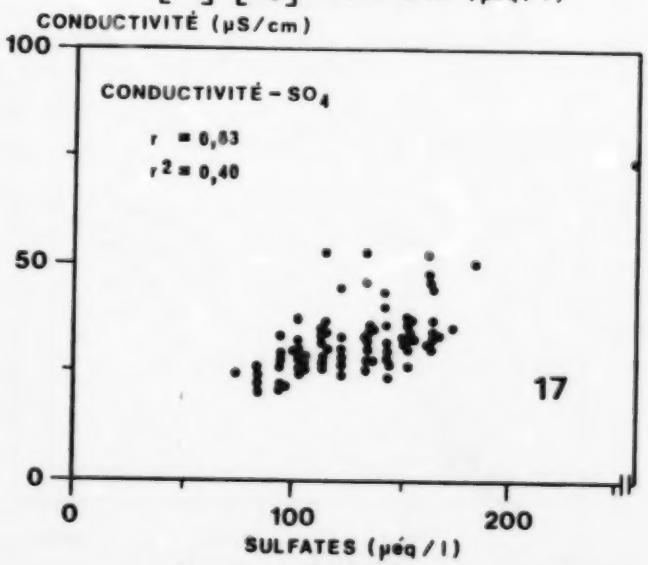
Annexe 4 (suite) Représentation graphique des corrélations de Spearman supérieures à r = 0,6.

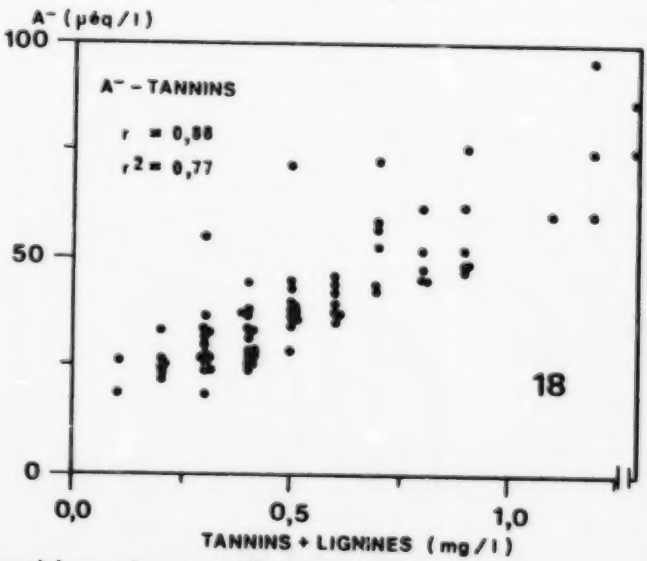




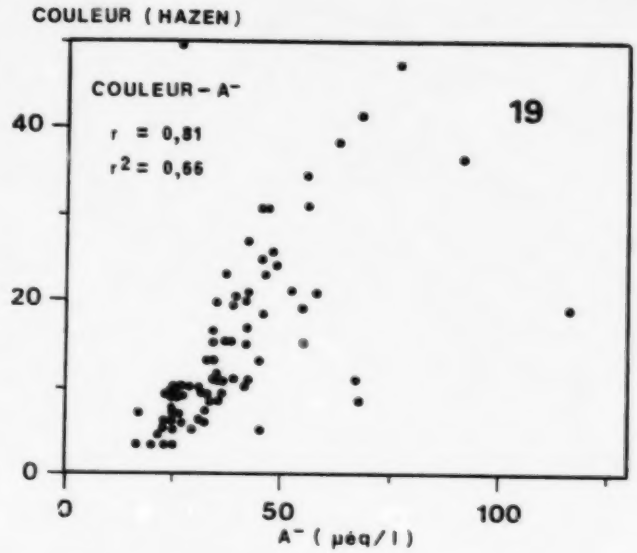


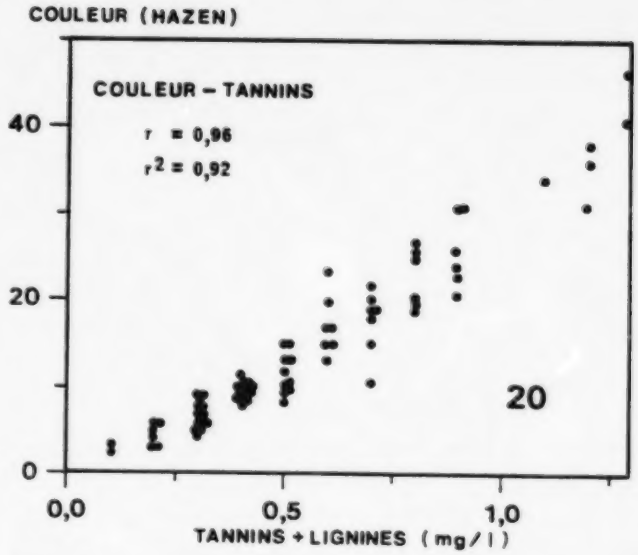


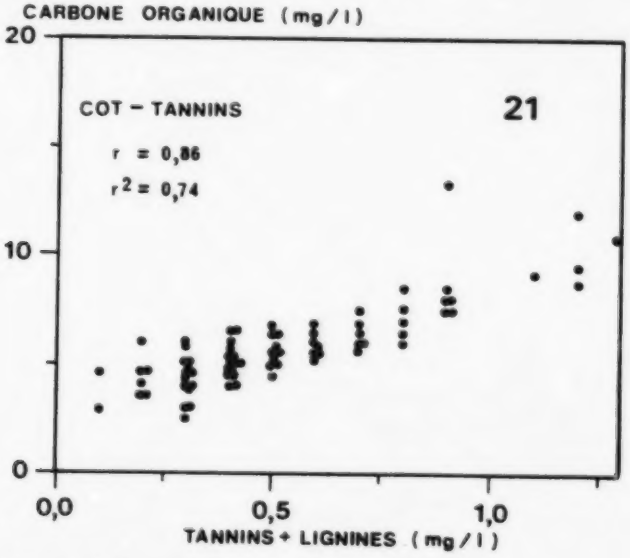


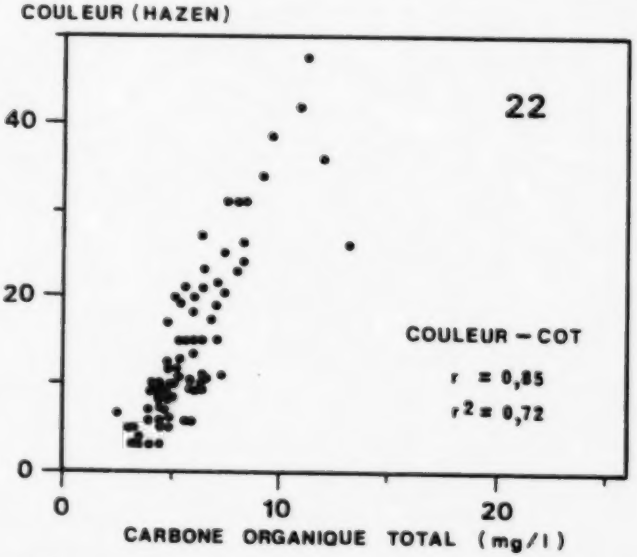


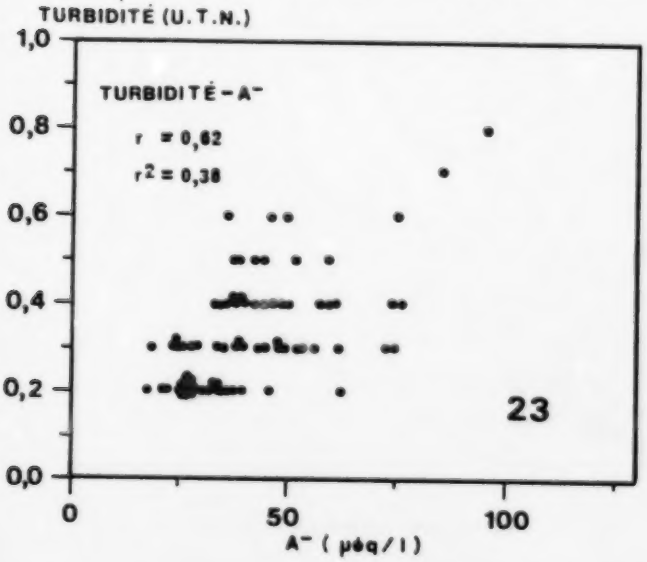
Annexe 4 (suite) Représentation graphique des corrélations de Spearman supérieures à r = 0,6.

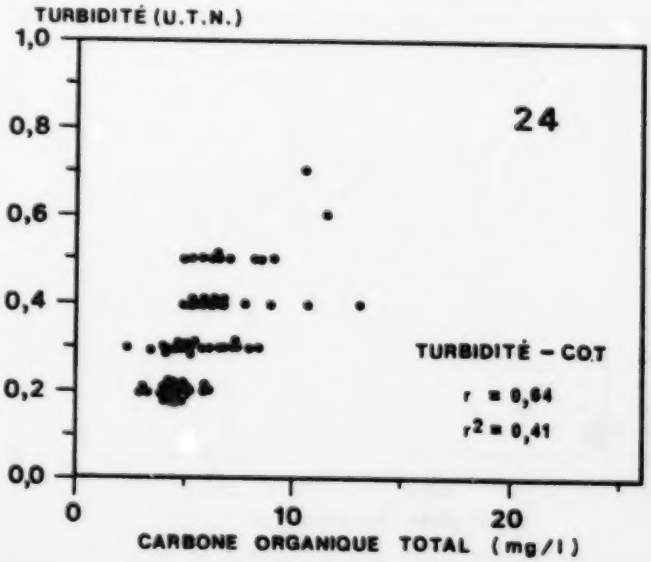




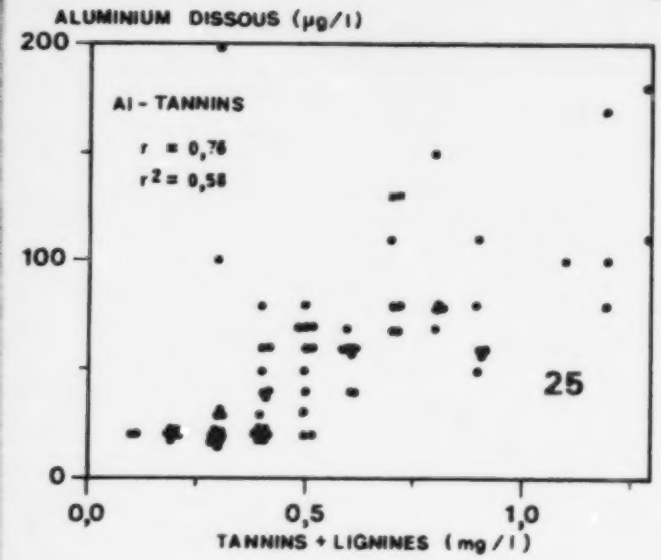


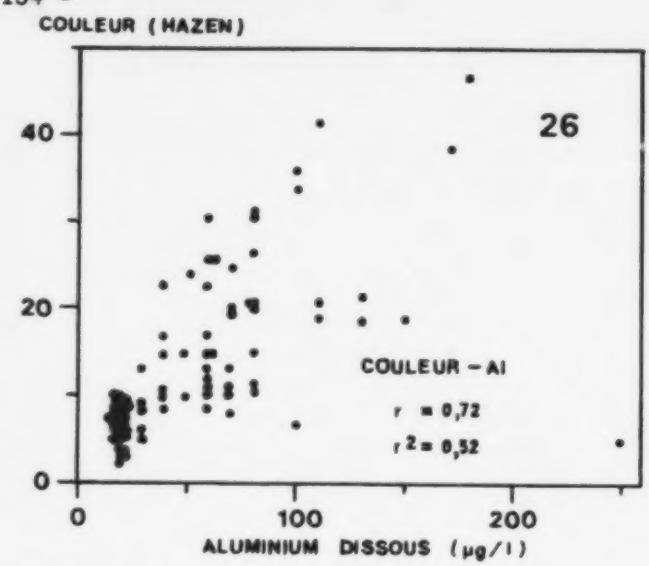


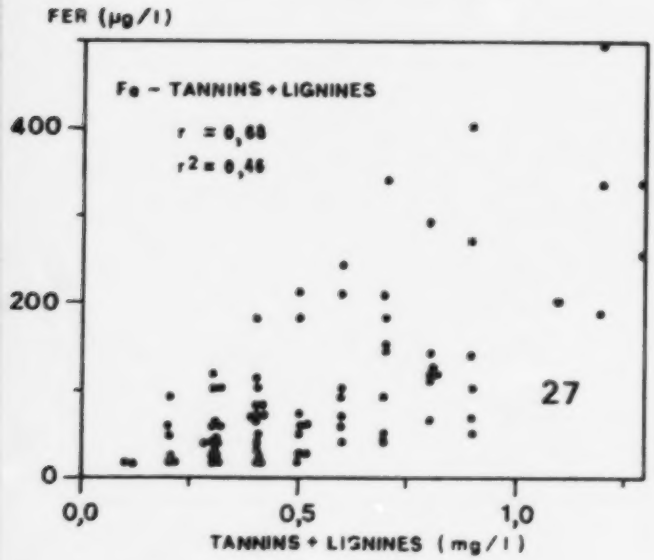


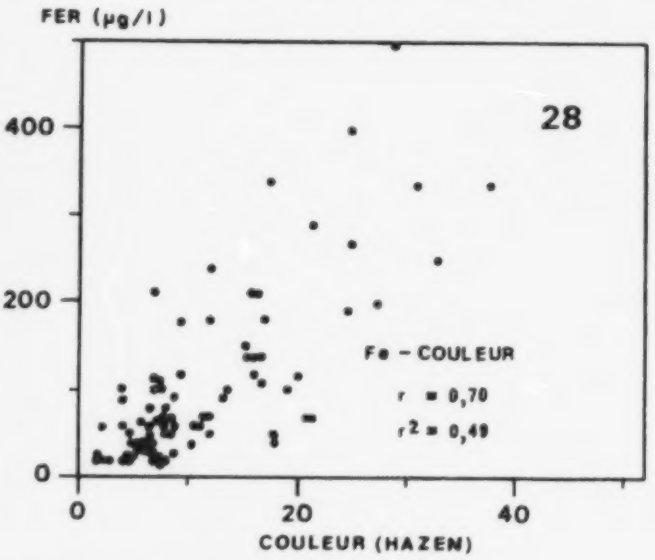


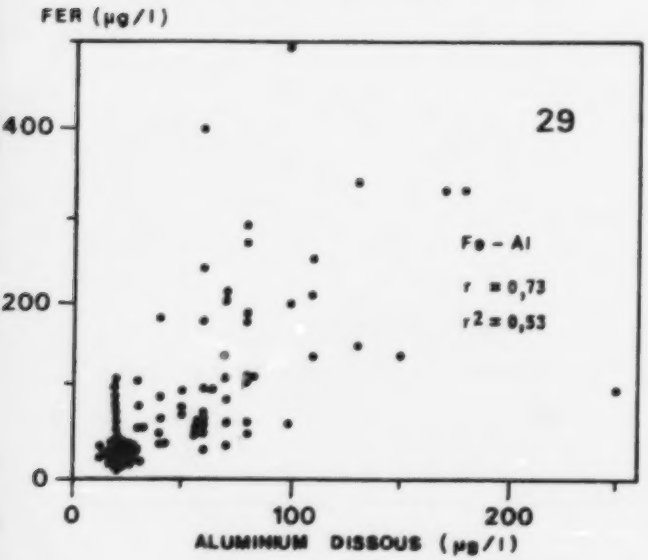
Annexe 4 (suite) Représentation graphique des corrélations de Spearman supérieures à r=0,6.

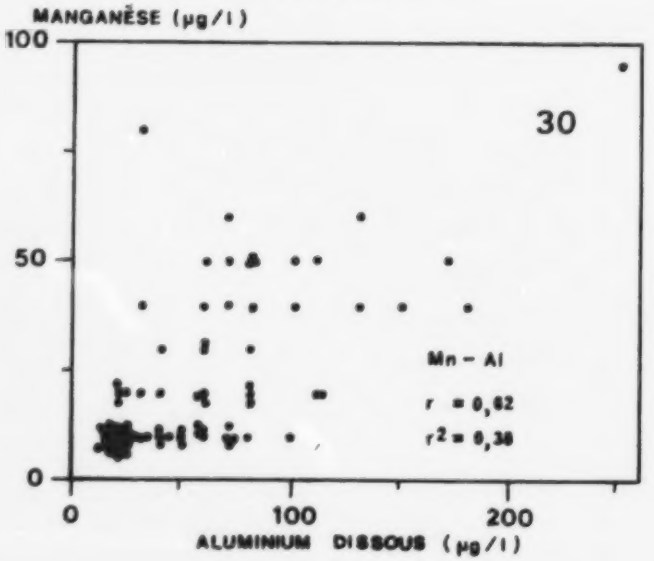












Annexe 4 (suite) Représentation graphique des corrélations de Spearman supérieures à r= 0,6.